



**TUGAS AKHIR (MO 141326)**

**STUDI EKSPERIMEN *SCOURING* PADA PIPA  
AKIBAT GELOMBANG IREGULER DENGAN  
KONDISI MELETAK DAN *IN-TRENCH***

**DIMAS RAMADHAN**

**NRP. 4313100073**

**DOSEN PEMBIMBING :**

**Suntoyo, S.T., M. Eng., Ph. D.**

**Drs. Mahmud Mustain, M. Sc., Ph. D.**

**DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN  
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2017**



**FINAL PROJECT (MO 141326)**

**EXPERIMENTAL STUDY OF SCOURING BELOW  
PIPE DUE TO IRREGULAR WAVES WITH LAID AND  
IN-TRENCH CONDITION**

**DIMAS RAMADHAN**

**NRP. 4313100073**

**SUPERVISORS :**

**Suntoyo, S.T., M. Eng., Ph. D.**

**Drs. Mahmud Mustain, M. Sc., Ph. D.**

**OCEAN ENGINEERING DEPARTEMENT**

**FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY**

**SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY**

**SURABAYA**

**2017**

**STUDI EKSPERIMEN *SCOURING* PADA PIPA AKIBAT GELOMBANG  
IREGULER DENGAN KONDISI MELETAK DAN *IN-TRENCH***

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada Program S-1 Departemen Teknik Kelautan  
Fakultas Teknologi Kelautan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**DIMAS RAMADHAN**

**NRP. 4313100073**

Disetujui Oleh :

1. Suntoyo, S.T., M. Eng., Ph. D. (Pembimbing I)

2. Drs. Mahmud Mustain, M. Sc., Ph. D. (Pembimbing II)

3. Dr. Ir. Wahyudi, M. Sc. (Penguji I)

4. Dr. Ir. Hasan Ikhwani, M. Sc. (Penguji II)

Surabaya, Juli 2017

## **STUDI EKSPERIMEN *SCOURING* PADA PIPA AKIBAT GELOMBANG IREGULER DENGAN KONDISI MELETAK DAN *IN-TRENCH***

**Nama** : Dimas Ramadhan  
**NRP** : 4313100073  
**Jurusan** : Teknik Kelautan  
**Dosen Pembimbing** : Suntoyo, S.T., M. Eng., Ph. D.  
Drs. M. Mustain, M. Sc., Ph. D.

### **ABSTRAK**

*Scouring* merupakan fenomena alam penggerusan tanah yang diakibatkan oleh arus dan gelombang. Pipa bawah laut sangat rawan sekali terjadi *scouring*, baik yang posisi meletak maupun yang terkubur (*in-trench*). *Scouring* mengakibatkan terjadinya *free span* yang tiap waktu semakin membesar. Apabila dibiarkan, akan mengakibatkan ketidakstabilan pipa, sehingga dapat memicu kegagalan. Karena *scouring* dapat membahayakan struktur pipa bawah laut, maka dalam tugas akhir ini akan dibahas tentang studi eksperimen *scouring* pada pipa. Ukuran diameter pipa yang digunakan dalam eksperimen adalah 1,5 inch dan panjang 25 cm. Pasir yang digunakan dalam pengujian adalah pasir pantai dengan *specific gravity* (GS) = 2,85 dan  $d_{50} = 0,55$  mm. Pipa tersebut akan diuji di *flume tank* dengan pengaruh gelombang ireguler. Terdapat 12 variasi yang dilakukan dalam eksperimen ini, 3 variasi  $H_i$  (7 cm, 6 cm dan 5 cm) dan 4 variasi peletakan ( $e/D = 0$ ,  $e/D = -0,052$ ,  $e/D = -0,079$  dan  $e/D = -0,105$ ). Setiap variasi dilakukan selama 40 menit, dan direkam menggunakan kamera. Tiap lima menit sekali, perubahan profil akan difoto. Hasil dari foto tersebut akan diplot ke AutoCAD kemudian diolah menggunakan Microsoft Excel untuk mengetahui kedalaman dan lebar dari perubahan profil 2D *scouring*. Sedangkan untuk mengetahui laju propagasi *scouring*, dapat diketahui dengan perhitungan empiris. Pada pipa kondisi meletak ( $e/D = 0$ ), kedalaman *scouring* ( $S_m/D$ ) yang terbentuk berkisar antara 0 – 0,276 dengan lebar *scouring* ( $W_m/D$ ) berkisar antara 0 – 1,995. Pada pipa kondisi *in-*

*trench* ( $e/D < 0$ ), kedalaman *scouring* ( $S_m/D$ ) yang terbentuk lebih kecil, yaitu berkisar antara 0 – 0,249. Lebar *scouring* ( $W_m/D$ ) yang terbentuk juga lebih kecil, yaitu berkisar antara 0 – 1,654. Laju propagasi *scouring* pada kondisi meletak ( $e/D = 0$ ) berkisar antara 0,0015 m/s – 0,0029 m/s. Sedangkan pada kondisi *in-trench* ( $e/D < 0$ ), laju propagasi *scouring* berkisar antara 0 m/s – 0,0035 m/s. Berdasarkan grafik hubungan dengan parameter-parameter tak berdimensi, seperti *wave steepness* ( $H/gT^2$ ), bilangan KC, *burial depth to diameter ratio* ( $e/D$ ), *mobility parameter* ( $\Psi$ ) dan *shield parameter* ( $\theta$ ) dapat ditarik kesimpulan bahwa tinggi gelombang dan bilangan KC berbanding lurus dengan besar kedalaman dan lebar *scouring* yang terbentuk. Apabila  $e/D \leq 0$ , semakin besar nilai  $e/D$ , maka kedalaman dan lebar *scouring* yang terbentuk juga semakin besar. Dan sebaliknya apabila  $e/D \geq 0$ , semakin besar nilai  $e/D$ , maka kedalaman dan lebar *scouring* yang terbentuk semakin kecil. Selain itu, semakin besar butiran sedimen di sekitar struktur pipa, maka semakin kasar permukaan sedimennya, sehingga kedalaman dan lebar *scouring* yang terbentuk semakin kecil.

**Kata kunci** : *scouring*, gelombang ireguler, pipa, meletak, *in-trench*, studi eksperimen

# **EXPERIMENTAL STUDY OF SCOURING BELOW PIPE DUE TO IRREGULAR WAVES WITH LAID AND IN-TRENCH CONDITIONS**

**Name** : Dimas Ramadhan  
**NRP** : 4313100073  
**Departement** : Ocean Engineering  
**Supervisors** : Suntoyo, S.T., M. Eng., Ph. D.  
Drs. M. Mustain, M. Sc., Ph. D.

## **ABSTRACT**

Scouring is a natural phenomenon caused by currents and waves. Submarine pipelines are very vulnerable to scouring, either in laid on the seabed or buried below it (in-trench). Scouring resulted the occurrence of free span that each time is getting larger. If left unchecked, it will cause instability of the pipe, so it can trigger a failure. Because scouring could harm the structure of subsea pipes, so in this final project will be discussed about the experimental study of scouring below pipe. The diameter of the pipe that is used in the experiment is 1.5 inches and 25 cm in length. The sand that is used in the test is a sand beach with specific gravity ( $GS$ ) = 2.85 and  $d_{50} = 0.55$  mm. The pipe will be tested on flume tank in irregular waves. There are 12 variations in this experiment, 3 variations of *wave height*  $H_i$  (7 cm, 6 cm and 5 cm) and 4 variations of laying condition ( $e / D = 0$ ,  $e / D = -0.052$ ,  $e / D = -0.079$  and  $e / D = -0.105$ ). Each variation is done for 40 minutes, and recorded by the camera. Every five minutes, a profile changes will be photographed. The result of the photo will be plotted to AutoCAD then processed using Microsoft Excel to get the scour depth and scour width from the 2D profile changes. On the laid pipe ( $e/D = 0$ ), the scour depth that is formed ( $S_m/D$ ) ranged between 0 – 0,276 with the scour width ( $W_m/D$ ) ranged between 0 – 1,995. On the in-trench pipe ( $e/D < 0$ ), the scour depth ( $S_m/D$ ) that is formed smaller, ranged between 0 – 0,249. The scour width ( $W_m/D$ ) that is formed also smaller, ranged between 0 – 1,654. The scour propagation rate on laid pipe ( $e/D = 0$ ) ranged between 0,0015 m/s – 0,0029 m/s.

While on in-trench pipe ( $e/D < 0$ ), the scour propagation rate ranged between 0 m/s – 0,0035 m/s. Based on graph of relationship with dimensionless parameters, such as wave steepness ( $H/gT^2$ ), KC number, burial depth to diameter ratio ( $e/D$ ), mobility parameter ( $\Psi$ ) and shield parameter ( $\theta$ ) can be drawn conclusions that the wave height and the KC number is proportional to the scour depth and scour width that are formed. If  $e / D \leq 0$ , the greater the value of  $e / D$ , then the scour depth and scour width that is formed also greater. And otherwise if  $e / D \geq 0$ , the greater the value of  $e / D$ , then the scour depth and scour width that are formed are smaller. Moreover, the larger the sediment grains around the pipe structure, the more rough the surface of the sediment, so the scour depth and scour width that are formed are smaller.

**Keyword : scouring, irregular waves, pipe, laid, in-trench, experimental study**

## KATA PENGANTAR

*Alhamdulillah*, segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah Subhanahu Wa Ta'ala, karena berkat rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini yang berjudul **“Studi Eksperimen *Scouring* pada Pipa Akibat Gelombang Ireguler dengan Kondisi Meletak dan *In-Trench*”** dengan baik dan lancar. Adapun tujuan dari penulisan Tugas Akhir ini adalah sebagai persyaratan dalam menyelesaikan Program Studi S-1 Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Tugas Akhir ini membahas tentang masalah *scouring* akibat pengaruh gelombang ireguler dan posisi peletakan pipa.

Dalam penyusunan laporan ini, penulis mohon maaf apabila terdapat kesalahan dan kekurangan. Kritik dan saran dari pembaca sangat diharapkan oleh penulis untuk perbaikan selanjutnya. Harapan penulis adalah semoga laporan ini dapat memberikan manfaat yang baik bagi perkembangan teknologi di Indonesia terutama dalam bidang rekayasa pantai.

Surabaya, 20 Juli 2017

Dimas Ramadhan



## UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam serangkaian kegiatan penyusunan Tugas Akhir ini, penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada pihak-pihak yang membantu secara langsung maupun tidak langsung mulai dari pemilihan topik hingga penyelesaian laporan. Penulis mengucapkan banyak terimakasih, khususnya kepada :

1. Bapak Poerwoto dan Ibu Sundari selaku orang tua penulis yang banyak memberikan motivasi belajar, dorongan semangat, bantuan finansial dan doa. Keluarga besar yang selalu memberikan dukungan semangat.
2. Suntoyo, S.T., M. Eng., Ph.D. selaku dosen pembimbing pertama Tugas Akhir yang telah bersedia membimbing penulis, memberikan ilmu, pengalaman, masukan dan saran, serta dorongan semangat dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.
3. Drs. Mahmud Mustain, M. Sc., Ph. D., selaku dosen pembimbing kedua Tugas Akhir dan Ketua Laboratorium Energi dan Lingkungan Laut yang telah memberikan perijinan penggunaan laboratorium, memberikan ilmu, masukan dan saran, serta dorongan spiritual dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.
4. Bapak M. Mochtar Arif selaku teknisi dan operator Laboratorium Energi dan Lingkungan Laut yang telah bersabar dalam menemani, memberikan masukan dan saran dalam serangkaian kegiatan eksperimen yang dilakukan oleh penulis.
5. Teman-teman pengguna Laboratorium Energi dan Lingkungan Laut, yang telah banyak memberikan bantuan tenaga dan dorongan semangat selama eksperimen dilakukan.
6. Teman 'Kos Bu Novi' yang selalu memberikan dukungan dan sedikit bantuan tenaga, serta berbagi susah-senang bersama.
7. Teman-teman Valtameri – L31 yang telah memberikan informasi tentang Tugas Akhir, jurnal, dan sumber-sumber yang berkaitan dengan topik Tugas Akhir penulis.

Semoga Allah membalas semua kebaikan yang telah dilakukan. *Aamiin*.

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>i</b>
<b>COVER PAGE .....</b>	<b>ii</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN .....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>vi</b>
<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>viii</b>
<b>UCAPAN TERIMA KASIH .....</b>	<b>ix</b>
<b>DAFTAR ISI .....</b>	<b>x</b>
<b>DAFTAR GAMBAR .....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xix</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	4
1.3 Tujuan Penelitian .....	4
1.4 Manfaat Penelitian .....	4
1.5 Batasan Masalah .....	5
1.6 Sistematika Penulisan .....	5
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI .....</b>	<b>7</b>
2.1 Tinjauan Pustaka .....	7
2.2 Dasar Teori .....	9
2.2.1 <i>Scouring</i> .....	9
2.2.2 Gelombang Ireguler .....	13
2.2.3 Kedalaman <i>Scouring</i> .....	15
2.2.4 Lebar <i>Scouring</i> .....	17
2.2.5 Laju Propagasi <i>Scouring</i> .....	18
2.2.6 Pengaruh Posisi Pipa .....	18
2.2.7 Pemodelan Fisik .....	20
2.2.8 Parameter Tak Berdimensi .....	21

2.2.9 Pengujian <i>Specific Gravity</i> dan Ayakan Tanah .....	23
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>27</b>
3.1 Diagram Alir Penelitian .....	27
3.2 Prosedur Penelitian .....	28
<b>BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>35</b>
4.1 Data Tanah .....	35
4.2 Data Gelombang .....	37
4.3 Hasil Eksperimen <i>Scouring</i> .....	40
4.3.1 Hasil Eksperimen <i>Scouring</i> untuk Pipa Kondisi Meletak.....	41
4.3.2 Hasil Eksperimen <i>Scouring</i> untuk Pipa Kondisi <i>In - Trench 2 mm</i> .....	48
4.3.3 Hasil Eksperimen <i>Scouring</i> untuk Pipa Kondisi <i>In - Trench 3 mm</i> .....	56
4.3.4 Hasil Eksperimen <i>Scouring</i> untuk Pipa Kondisi <i>In - Trench 4 mm</i> .....	63
4.4 Hasil Perhitungan Laju Propagasi <i>Scouring</i> .....	70
4.5 Validasi Hasil Eksperimen dengan Rumus Empiris .....	71
4.6 Analisa Hubungan <i>Scouring</i> dengan Parameter Tak Berdimensi .	74
4.7 Perbandingan Hasil Eksperimen dengan Penelitian Lain .....	81
<b>BAB IV PENUTUP .....</b>	<b>85</b>
5.1 Kesimpulan .....	85
5.2 Saran .....	86
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>87</b>
<b>LAMPIRAN</b>	
• <b>LAMPIRAN A HASIL PENGOLAHAN DATA GELOMBANG DENGAN ANAWARE .....</b>	<b>A-1</b>

- **LAMPIRAN B FOTO HASIL PENGAMATAN *SCOURING* TIAP 5 MENIT** ..... B-1
- **LAMPIRAN C DATA HUBUNGAN *SCOURING* DENGAN PARAMETER TAK BERDIMENSI** ..... C-1
- **LAMPIRAN D DATA PERBANDINGAN HASIL EKSPERIMEN DENGAN PENELITIAN LAIN** ..... D-1

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Data Statistik Konsumsi Minyak Indonesia (Sumber : BP Statistical Review of World Energy) .....	1
Gambar 2.1 Proses penyaluran fluida dengan <i>subsea pipelines</i> (Bai & Bai, 2014).....	7
Gambar 2.2 <i>Seepage flow</i> di bawah struktur pipa (Sumer & Fredsøe, 2002) .	10
Gambar 2.3 <i>Tunnel erosion</i> di bawah struktur pipa (Sumer & Fredsøe, 2002) .....	11
Gambar 2.4 <i>Lee-wake erosion</i> pada struktur pipa (Sumer & Fredsøe, 2002) .....	11
Gambar 2.5 Gelombang ireguler terhadap (a) waktu dan (b) tempat (Bhattacharyya, 1972) .....	14
Gambar 2.6 <i>Time development</i> kedalaman <i>scour</i> , (a) Arus, $\theta = 0,098$ (Mao, 1986), (b) Gelombang, $\theta = 0,035$ , $KC = 27$ (Fredsøe & Deigaard, 1992).....	15
Gambar 2.7 Laju propagasi <i>scouring</i> arah ke kanan ( $V_R$ ) dan ke kiri ( $V_L$ ) pipa (Cheng <i>et al.</i> , 2009) .....	18
Gambar 3.1 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir .....	27
Gambar 3.2 Ukuran diameter model pipa yang digunakan .....	29
Gambar 3.3 Sketsa pengujian tampak samping .....	29
Gambar 3.4 Sketsa pengujian tampak atas .....	30
Gambar 3.5 <i>Flume Tank</i> Jurusan Teknik Kelautan ITS.....	32
Gambar 3.6 <i>Wave Probe</i> .....	32
Gambar 4.1 Grafik analisa hasil pengujian pembagian butir tanah .....	36
Gambar 4.2 Pembacaan data format <i>time history</i> (.TMH) dari <i>wave probe</i> dengan menggunakan Excel Refana .....	38
Gambar 4.3 Tampilan pengolahan data gelombang menggunakan AnaWare .....	39
Gambar 4.4 Kondisi awal ( $t = 0$ menit) eksperimen <i>scouring</i> pada pipa kondisi meletak dengan $H_{avg} = 5,55$ cm dan $T_{avg} = 2,02$ s.....	41

Gambar 4.5 Kondisi eksperimen <i>scouring</i> pada $t = 20$ menit pada pipa	
kondisi meletak dengan $H_{avg} = 5,55$ cm dan $T_{avg} = 2,02$ s.....	42
Gambar 4.6 Kondisi akhir ( $t = 40$ menit) eksperimen <i>scouring</i> pada pipa	
kondisi meletak dengan $H_{avg} = 5,55$ cm dan $T_{avg} = 2,02$ s.....	42
Gambar 4.7 Perubahan profil 2D <i>scouring</i> pipa kondisi meletak dengan	
$H_{avg} = 5,55$ cm dan $T_{avg} = 2,02$ s.....	43
Gambar 4.8 Kondisi awal ( $t = 0$ menit) eksperimen <i>scouring</i> pada pipa	
kondisi meletak dengan $H_{avg} = 6,37$ cm dan $T_{avg} = 2,15$ s.....	44
Gambar 4.9 Kondisi eksperimen <i>scouring</i> pada $t = 20$ menit pada pipa	
kondisi meletak dengan $H_{avg} = 6,37$ cm dan $T_{avg} = 2,15$ s.....	44
Gambar 4.10 Kondisi akhir ( $t = 40$ menit) eksperimen <i>scouring</i> pada pipa	
kondisi meletak dengan $H_{avg} = 6,37$ cm dan $T_{avg} = 2,15$ s.....	45
Gambar 4.11 Perubahan profil 2D <i>scouring</i> pipa kondisi meletak dengan	
$H_{avg} = 6,37$ cm dan $T_{avg} = 2,15$ s.....	45
Gambar 4.12 Kondisi awal ( $t = 0$ menit) eksperimen <i>scouring</i> pada pipa	
kondisi meletak dengan $H_{avg} = 6,92$ cm dan $T_{avg} = 2,06$ s.....	46
Gambar 4.13 Kondisi eksperimen <i>scouring</i> pada $t = 20$ menit pada pipa	
kondisi meletak dengan $H_{avg} = 6,92$ cm dan $T_{avg} = 2,06$ s.....	47
Gambar 4.14 Kondisi akhir ( $t = 40$ menit) eksperimen <i>scouring</i> pada pipa	
kondisi meletak dengan $H_{avg} = 6,92$ cm dan $T_{avg} = 2,06$ s.....	47
Gambar 4.15 Perubahan profil 2D <i>scouring</i> pipa kondisi meletak dengan	
$H_{avg} = 6,92$ cm dan $T_{avg} = 2,06$ s.....	48
Gambar 4.16 Kondisi awal ( $t = 0$ menit) eksperimen <i>scouring</i> pada pipa kondisi	
<i>in-trench</i> 2 mm dengan $H_{avg} = 5,63$ cm dan $T_{avg} = 2,03$ s .....	49
Gambar 4.17 Kondisi eksperimen <i>scouring</i> pada $t = 20$ menit pada pipa	
kondisi <i>in-trench</i> 2 mm dengan	
$H_{avg} = 5,63$ cm dan $T_{avg} = 2,03$ s .....	49
Gambar 4.18 Kondisi akhir ( $t = 40$ menit) eksperimen <i>scouring</i> pada pipa	
kondisi <i>in-trench</i> 2 mm dengan	
$H_{avg} = 5,63$ cm dan $T_{avg} = 2,03$ s .....	50
Gambar 4.19 Perubahan profil 2D <i>scouring</i> pipa kondisi <i>in-trench</i> 2 mm	
dengan $H_{avg} = 5,63$ cm dan $T_{avg} = 2,03$ s .....	50

Gambar 4.20 Kondisi awal ( $t = 0$ menit) eksperimen <i>scouring</i> pada pipa kondisi <i>in-trench</i> 2 mm dengan $H_{avg} = 6,57$ cm dan $T_{avg} = 2,18$ s .....	51
Gambar 4.21 Kondisi eksperimen <i>scouring</i> pada $t = 20$ menit pada pipa kondisi <i>in-trench</i> 2 mm dengan $H_{avg} = 6,57$ cm dan $T_{avg} = 2,18$ s .....	52
Gambar 4.22 Kondisi akhir ( $t = 40$ menit) eksperimen <i>scouring</i> pada pipa kondisi <i>in-trench</i> 2 mm dengan $H_{avg} = 6,57$ cm dan $T_{avg} = 2,18$ s .....	52
Gambar 4.23 Perubahan profil 2D <i>scouring</i> pipa kondisi <i>in-trench</i> 2 mm dengan $H_{avg} = 6,57$ cm dan $T_{avg} = 2,18$ s .....	53
Gambar 4.24 Kondisi awal ( $t = 0$ menit) eksperimen <i>scouring</i> pada pipa kondisi <i>in-trench</i> 2 mm dengan $H_{avg} = 6,95$ cm dan $T_{avg} = 2,07$ s .....	54
Gambar 4.25 Kondisi eksperimen <i>scouring</i> pada $t = 20$ menit pada pipa kondisi <i>in-trench</i> 2 mm dengan $H_{avg} = 6,95$ cm dan $T_{avg} = 2,07$ s .....	54
Gambar 4.26 Kondisi akhir ( $t = 40$ menit) eksperimen <i>scouring</i> pada pipa kondisi <i>in-trench</i> 2 mm dengan $H_{avg} = 6,95$ cm dan $T_{avg} = 2,07$ s .....	55
Gambar 4.27 Perubahan profil 2D <i>scouring</i> pipa kondisi <i>in-trench</i> 2 mm dengan $H_{avg} = 6,95$ cm dan $T_{avg} = 2,07$ s .....	55
Gambar 4.28 Kondisi awal ( $t = 0$ menit) eksperimen <i>scouring</i> pada pipa kondisi <i>in-trench</i> 3 mm dengan $H_{avg} = 5,99$ cm dan $T_{avg} = 2,04$ s .....	56
Gambar 4.29 Kondisi eksperimen <i>scouring</i> pada $t = 20$ menit pada pipa kondisi <i>in-trench</i> 3 mm dengan $H_{avg} = 5,99$ cm dan $T_{avg} = 2,04$ s .....	57
Gambar 4.30 Kondisi akhir ( $t = 40$ menit) eksperimen <i>scouring</i> pada pipa kondisi <i>in-trench</i> 3 mm dengan $H_{avg} = 5,99$ cm dan $T_{avg} = 2,04$ s .....	57
Gambar 4.31 Perubahan profil 2D <i>scouring</i> pipa kondisi <i>in-trench</i> 3 mm dengan $H_{avg} = 5,99$ cm dan $T_{avg} = 2,04$ s .....	58
Gambar 4.32 Kondisi awal ( $t = 0$ menit) eksperimen <i>scouring</i> pada pipa kondisi <i>in-trench</i> 3 mm dengan $H_{avg} = 6,48$ cm dan $T_{avg} = 2,16$ s .....	59

Gambar 4.33 Kondisi eksperimen <i>scouring</i> pada $t = 20$ menit pada pipa kondisi <i>in-trench</i> 3 mm dengan $H_{avg} = 6,48$ cm dan $T_{avg} = 2,16$ s .....	59
Gambar 4.34 Kondisi akhir ( $t = 40$ menit) eksperimen <i>scouring</i> pada pipa kondisi <i>in-trench</i> 3 mm dengan $H_{avg} = 6,48$ cm dan $T_{avg} = 2,16$ s .....	60
Gambar 4.35 Perubahan profil 2D <i>scouring</i> pipa kondisi <i>in-trench</i> 3 mm dengan $H_{avg} = 6,48$ cm dan $T_{avg} = 2,16$ s .....	60
Gambar 4.36 Kondisi awal ( $t = 0$ menit) eksperimen <i>scouring</i> pada pipa kondisi <i>in-trench</i> 3 mm dengan $H_{avg} = 7,05$ cm dan $T_{avg} = 2,06$ s .....	61
Gambar 4.37 Kondisi eksperimen <i>scouring</i> pada $t = 20$ menit pada pipa kondisi <i>in-trench</i> 3 mm dengan $H_{avg} = 7,05$ cm dan $T_{avg} = 2,06$ s .....	62
Gambar 4.38 Kondisi akhir ( $t = 40$ menit) eksperimen <i>scouring</i> pada pipa kondisi <i>in-trench</i> 3 mm dengan $H_{avg} = 7,05$ cm dan $T_{avg} = 2,06$ s .....	62
Gambar 4.39 Perubahan profil 2D <i>scouring</i> pipa kondisi <i>in-trench</i> 3 mm dengan $H_{avg} = 7,05$ cm dan $T_{avg} = 2,06$ s .....	63
Gambar 4.40 Kondisi awal ( $t = 0$ menit) eksperimen <i>scouring</i> pada pipa kondisi <i>in-trench</i> 4 mm dengan $H_{avg} = 5,22$ cm dan $T_{avg} = 2,02$ s .....	64
Gambar 4.41 Kondisi eksperimen <i>scouring</i> pada $t = 20$ menit pada pipa kondisi <i>in-trench</i> 4 mm dengan $H_{avg} = 5,22$ cm dan $T_{avg} = 2,02$ s .....	64
Gambar 4.42 Kondisi akhir ( $t = 40$ menit) eksperimen <i>scouring</i> pada pipa kondisi <i>in-trench</i> 4 mm dengan $H_{avg} = 5,22$ cm dan $T_{avg} = 2,02$ s.....	65
Gambar 4.43 Perubahan profil 2D <i>scouring</i> pipa kondisi <i>in-trench</i> 4 mm dengan $H_{avg} = 5,22$ cm dan $T_{avg} = 2,02$ s .....	65
Gambar 4.44 Kondisi awal ( $t = 0$ menit) eksperimen <i>scouring</i> pada pipa kondisi <i>in-trench</i> 4 mm dengan $H_{avg} = 6,08$ cm dan $T_{avg} = 2,17$ s .....	66



Gambar 4.45 Kondisi eksperimen <i>scouring</i> pada $t = 20$ menit pada pipa kondisi <i>in-trench</i> 4 mm dengan $H_{avg} = 6,08$ cm dan $T_{avg} = 2,17$ s .....	67
Gambar 4.46 Kondisi akhir ( $t = 40$ menit) eksperimen <i>scouring</i> pada pipa kondisi <i>in-trench</i> 4 mm dengan $H_{avg} = 6,08$ cm dan $T_{avg} = 2,17$ s.....	67
Gambar 4.47 Perubahan profil 2D <i>scouring</i> pipa kondisi <i>in-trench</i> 4 mm dengan $H_{avg} = 6,08$ cm dan $T_{avg} = 2,17$ s .....	68
Gambar 4.48 Kondisi awal ( $t = 0$ menit) eksperimen <i>scouring</i> pada pipa kondisi <i>in-trench</i> 4 mm dengan $H_{avg} = 6,66$ cm dan $T_{avg} = 2,07$ s .....	68
Gambar 4.49 Kondisi eksperimen <i>scouring</i> pada $t = 20$ menit pada pipa kondisi <i>in-trench</i> 4 mm dengan $H_{avg} = 6,66$ cm dan $T_{avg} = 2,07$ s .....	69
Gambar 4.50 Kondisi akhir ( $t = 40$ menit) eksperimen <i>scouring</i> pada pipa kondisi <i>in-trench</i> 4 mm dengan $H_{avg} = 6,66$ cm dan $T_{avg} = 2,07$ s .....	69
Gambar 4.51 Perubahan profil 2D <i>scouring</i> pipa kondisi <i>in-trench</i> 4 mm dengan $H_{avg} = 6,66$ cm dan $T_{avg} = 2,07$ s .....	70
Gambar 4.52 Grafik hubungan antara <i>wave steepness parameter</i> ( $H/gT^2$ ) dengan <i>non dimensional scour depth</i> ( $S_m/D$ ).....	74
Gambar 4.53 Grafik hubungan antara <i>wave steepness parameter</i> ( $H/gT^2$ ) dengan <i>non dimensional scour width</i> ( $W_m/D$ ) .....	75
Gambar 4.54 Grafik hubungan antara bilangan KC dengan <i>non dimensional scour depth</i> ( $S_m/D$ ) .....	76
Gambar 4.55 Grafik hubungan antara bilangan KC dengan <i>non dimensional scour width</i> ( $W_m/D$ ) .....	76
Gambar 4.56 Grafik hubungan antara <i>buried depth-diameter ratio</i> ( $e/D$ ) dengan <i>non dimensional scour depth</i> ( $S_m/D$ ) .....	77
Gambar 4.57 Grafik hubungan antara <i>buried depth-diameter ratio</i> ( $e/D$ ) dengan <i>non dimensional scour width</i> ( $W_m/D$ ) .....	78
Gambar 4.58 Grafik hubungan antara <i>mobility parameter</i> ( $\Psi$ ) dengan <i>non dimensional scour depth</i> ( $S_m/D$ ) .....	79

Gambar 4.59 Grafik hubungan antara <i>mobility parameter</i> ( $\Psi$ )	
dengan <i>non dimensional scour width</i> ( $W_m/D$ ) .....	79
Gambar 4.60 Grafik hubungan antara <i>shield parameter</i> ( $\theta$ )	
dengan <i>non dimensional scour depth</i> ( $S_m/D$ ) .....	80
Gambar 4.61 Grafik hubungan antara <i>shield parameter</i> ( $\theta$ )	
dengan <i>non dimensional scour width</i> ( $W_m/D$ ) .....	81
Gambar 4.62 Perbandingan hasil eksperimen pengaruh KC terhadap	
<i>non dimensional scour depth</i> ( $S_m/D$ ) .....	82
Gambar 4.63 Perbandingan hasil eksperimen pengaruh $e/D$ terhadap	
<i>non dimensional scour depth</i> ( $S_m/D$ ) .....	83

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Variasi percobaan yang akan dilakukan .....	30
Tabel 4.1 Hasil pengujian <i>specific gravity</i> .....	35
Tabel 4.2 Hasil analisa pengujian pembagian butir tanah.....	36
Tabel 4.3 Hasil pengolahan data gelombang dengan AnaWare .....	40
Tabel 4.4 Hasil perhitungan laju propagasi <i>scouring</i> pada setiap variasi eksperimen .....	71
Tabel 4.5 Hasil perhitungan k pada setiap variasi eksperimen .....	72
Tabel 4.6 Hasil perhitungan KC pada setiap variasi eksperimen .....	72
Tabel 4.7 Hasil validasi kedalaman <i>scouring</i> .....	73
Tabel 4.8 Hasil validasi lebar <i>scouring</i> .....	73

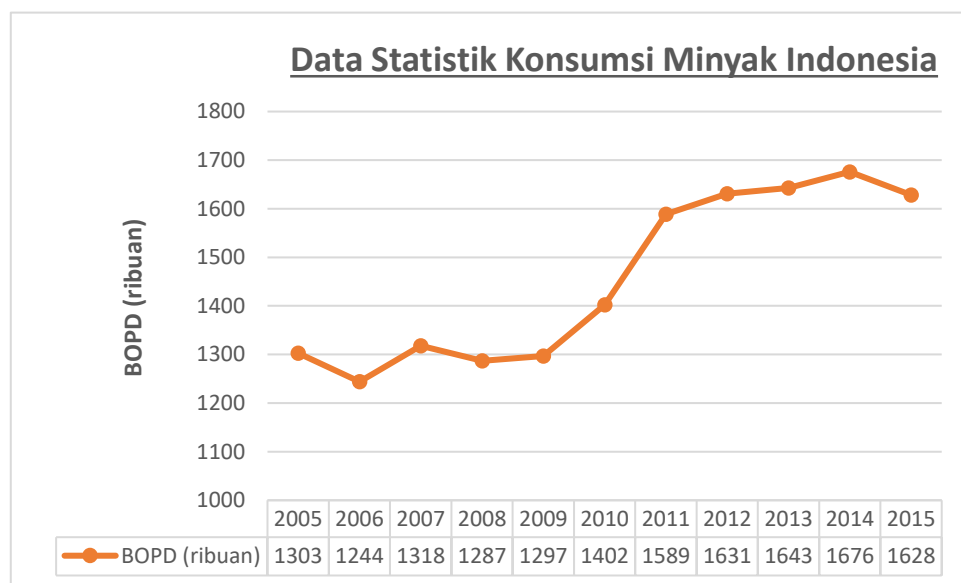
*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Minyak dan gas bumi merupakan sumber daya alam yang banyak digunakan oleh manusia untuk memenuhi kebutuhan akan energi. Berdasarkan BP Statistical Review of World Energy, konsumsi minyak di Indonesia cenderung mengalami kenaikan. Berikut adalah data konsumsi minyak di Indonesia dari tahun 2005 – 2015.



Gambar 1.1 Data Statistik Konsumsi Minyak Indonesia

(Sumber : BP Statistical Review of World Energy)

Meskipun harga minyak di pasaran sedang jatuh, kegiatan eksplorasi dan eksploitasi di ladang-ladang minyak dan gas baru masih tetap dilakukan karena dianggap masih potensial. Hal ini dikarenakan peningkatan jumlah penduduk yang tidak didukung oleh persediaan sumber daya alam yang ada. Terbukti di wilayah perairan Indonesia terdapat 530 buah *offshore platform* (Suntoyo, 2016).

Salah satu sumber minyak dan gas bumi berada di daerah lepas pantai (*offshore*). Minyak dan gas bumi berasal dari sumur-sumur melalui proses pengeboran, kemudian diangkut ke atas menggunakan *conductor* dan *riser* kemudian disalurkan ke tempat produksi dengan menggunakan sistem

perpipaan (*piping*). Fluida tersebut ada yang langsung diolah di bangunan itu sendiri dan ada juga yang diolah di bangunan lainnya dan ada juga yang diolah di *onshore*. Fluida yang akan diolah di *onshore* menggunakan jaringan pipa bawah laut sebagai moda transportasi yang efektif dalam pendistribusiannya dari *offshore* ke *onshore*. Begitu pula apabila diproduksi di bangunan lain juga menggunakan pipa sebagai penyalur fluidanya.

Rute yang dilalui oleh pipa tersebut sangat panjang dan beragam. Kondisi morfologi dan lingkungan laut yang beragam juga membuat jaringan pipa bawah laut banyak menemui permasalahan. Oleh karena itu, dalam perancangan pipa bawah laut harus mempertimbangkan kondisi lingkungan mulai dari lokasi, arus, gelombang dan faktor yang lain. Kemudian dilakukan pengecekan dengan standar yang digunakan untuk faktor keamanan.

Salah satu permasalahan yang sering terjadi adalah *scouring*. *Scouring* merupakan fenomena alam penggerusan tanah yang diakibatkan oleh arus dan gelombang. Adanya struktur pada lingkungan laut akan mengubah pola aliran arus di lingkungan terdekatnya. Hal ini akan mengakibatkan adanya kontraksi aliran, pembentukan *vortex*, turbulensi, terjadinya gelombang pecah, difraksi dan refleksi yang memungkinkan adanya material yang terbawa oleh arus (Breusers & Radkivi, 1991). *Scouring* bisa terjadi pada pipa, baik yang posisi meletak maupun yang terbenam di dalam tanah dengan kedalaman tertentu (Suntoyo, 2016). *Scouring* mengakibatkan terjadinya *free span* yang tiap waktu semakin membesar. Apabila hal ini dibiarkan, akan mengakibatkan ketidakstabilan pipa sehingga dapat memicu kegagalan. Kegagalan pada pipa bawah laut dapat menghambat proses produksi dan yang paling parah bisa mengakibatkan kebocoran dan kebakaran yang bisa merusak ekosistem laut. Oleh karena itu, perlu dilakukan inspeksi secara berkala pada struktur bawah laut, seperti *subsea pipeline* untuk mencegah adanya kegagalan.

Berdasarkan data statistik kegagalan pipa, sebesar 44,3 % kejadian yang terjadi di Delta Mississippi dan Teluk Meksiko diakibatkan oleh *freespan development* (Herbich, 1981). Karena *scouring* dapat membahayakan struktur bawah laut, banyak penelitian yang dilakukan untuk membahas masalah *scouring*. Mulai dari Kjeldsen *et al.* (1973) hingga dikembangkan oleh Sumer

dan Fredsøe (2002). Selain peneliti tersebut, penelitian *scouring* pada *subsea pipeline* juga pernah dilakukan oleh beberapa mahasiswa Jurusan Teknik Kelautan ITS Surabaya, diantaranya Nugroho (2011) yang menganalisa *scouring* pipa bawah laut Kodeco jalur Poleng – Gresik dengan variasi tipe tanah. Penelitian tersebut menghasilkan kesimpulan bahwa semakin kecil diameter butiran tanah, maka semakin mudah terjadinya *scouring*. Selain itu, Nugraha (2012) yang menganalisa pengaruh *scouring* pada pipa bawah laut (studi kasus pipa gas transmisi SSWJ jalur pipa gas Labuhan Maringgai – Muara Bekasi. Penelitian tersebut menghasilkan kesimpulan bahwa semua zona telah memenuhi kriteria frekuensi *vortex shedding* ( $f_s$ )  $< 0,7$  frekuensi natural ( $f_n$ ). Semakin besar kedalaman *scouring*, maka panjang *freespan* yang diijinkan semakin kecil. Dari penelitian Nugraha tersebut, dikembangkan lagi dengan pemodelan 2D oleh Pebriantina (2016) dengan variasi diameter pipa dan kondisi *in-trench*. Penelitian tersebut menghasilkan kesimpulan bahwa semakin besar diameter pipa, kedalaman dan lebar *scouring* juga semakin besar. Selain Pebriantina (2016), Budiarti (2016) juga melakukan penelitian tentang pemodelan numerik profil 2D *scouring* pada pipa bawah laut dengan variasi jarak *clearance* terhadap dasar laut. Penelitian tersebut menghasilkan kesimpulan bahwa nilai kedalaman *scouring* akan menurun akan semakin menurun seiring bertambahnya nilai  $e$  ( $gap/clearance$ ).

Dari penelitian yang telah dilakukan mahasiswa diatas, belum ada penelitian tentang analisa *scouring* terhadap pipa bawah laut akibat gelombang ireguler dan studi eksperimennya. Sebelumnya, Suntoyo dkk. (2016) berhasil mengembangkan model tegangan geser dasar, yaitu laju sedimen dasar akibat pergerakan gelombang ireguler dan aplikasinya ke perubahan morfologi pantai. Penelitian tersebut mendapatkan hasil yang akurat dibandingkan dengan pengukuran di Laboratorium *Flume Tank* Jurusan Teknik Kelautan ITS. Oleh karena itu, pada tugas akhir ini akan dibahas tentang studi eksperimen *scouring* pada pipa akibat gelombang ireguler dengan kondisi meletak dan *in-trench*. Ukuran diameter pipa yang ditinjau adalah 16 inch. Pipa tersebut akan ditinjau pada lokasi perairan dengan kondisi gelombang ireguler. Eksperimen ini akan dilakukan di Laboratorium *Flume Tank* Jurusan Teknik Kelautan.

Sebelum dilakukan eksperimen, akan dibuat model terlebih dahulu. Setelah eksperimen selesai, dilakukan analisa dan pembahasan terkait hasil eksperimen hingga mendapatkan kesimpulan.

## 1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang akan diangkat pada studi eksperimen tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana hasil kedalaman dan lebar *scouring* akibat gelombang ireguler pada pipa dengan kondisi meletak maupun *in-trench* ?
2. Bagaimana laju propagasi *scouring* akibat gelombang ireguler pada pipa dengan kondisi meletak maupun *in-trench* ?
3. Bagaimana hubungan kedalaman dan lebar *scouring* dengan parameter-parameter tak berdimensi, yaitu *wave steepness* ( $H/gT^2$ ), *KC number*, *burial depth to diameter ratio* ( $e/D$ ), *mobility parameter* ( $\Psi$ ) dan *shield parameter* ( $\theta$ ) ?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari studi eksperimen tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Mendapatkan nilai kedalaman dan lebar *scouring* akibat gelombang ireguler pada pipa dengan kondisi meletak maupun *in-trench*.
2. Mengetahui laju propagasi *scouring* akibat gelombang ireguler pada pipa dengan kondisi meletak maupun *in-trench*.
3. Mengetahui hubungan antara kedalaman dan lebar *scouring* dengan parameter tak berdimensi, yaitu *wave steepness* ( $H/gT^2$ ), *KC number*, *burial depth to diameter ratio* ( $e/D$ ), *mobility parameter* ( $\Psi$ ) dan *shield parameter* ( $\theta$ ).

## 1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penulis untuk tugas akhir ini adalah dapat dijadikan bahan perbandingan hasil analisa *scouring* menggunakan metode eksperimen dengan menggunakan metode yang lainnya, misal metode numerik



atau metode perhitungan manual. Selain itu, penelitian ini diharapkan mampu menemukan rumus empiris untuk kondisi ( $e/D < 0$ ). Penelitian ini juga diharapkan bisa dikembangkan lebih jauh lagi dengan pemodelan 3D *scouring* pada pipa.

### 1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah diberikan dalam studi eksperimen tugas akhir ini agar pembahasan tidak melebar dari topik yang dibahas. Berikut adalah batasan masalah pada penelitian tugas akhir ini :

1. Tidak ada pelindung pada pipa.
2. Kemiringan *seabed* diabaikan.
3. Gelombang yang dimodelkan adalah gelombang ireguler.
4. Tinggi gelombang dan periode gelombang ditentukan.
5. Kedalaman perairan disesuaikan dengan kapasitas laboratorium.
6. Analisa *scouring* yang dilakukan merupakan analisa dua dimensi.
7. Metode yang digunakan adalah metode eksperimen.
8. Ukuran diameter pipa yang akan ditinjau adalah 16 inch.
9. Jenis, berat, dan tebal pipa pada eksperimen diabaikan.
10. Nilai  $e/D$  yang divariasikan lebih kecil atau sama dengan 0.

### 1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika yang digunakan dalam penyusunan laporan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

#### BAB I Pendahuluan

Bab ini menjelaskan beberapa hal tentang penelitian dalam tugas akhir, yaitu latar belakang dilakukannya penelitian ini, perumusan masalah yang diangkat, tujuan yang digunakan untuk menjawab permasalahan yang diangkat, manfaat dari penelitian tugas akhir yang dilakukan, batasan dari penelitian tugas akhir ini agar pembahasan tidak meluas, serta penjelasan dari sistematika laporan yang digunakan dalam tugas akhir.

## BAB II Tinjauan Pustaka dan Dasar Teori

Bab ini menjelaskan tentang tinjauan pustaka dan dasar teori yang menjadi acuan dalam menyelesaikan perumusan masalah yang ada di penelitian tugas akhir ini.

## BAB III Metodologi Penelitian

Bab ini menjelaskan urutan langkah-langkah yang dilakukan secara terperinci untuk menyelesaikan permasalahan yang ada di penelitian tugas akhir ini.

## BAB IV Analisa dan Pembahasan Hasil

Bab ini menjelaskan tentang semua hasil yang diperoleh pada eksperimen yang dilakukan. Hasil tersebut kemudian diolah untuk digunakan dalam menjawab rumusan masalah yang ada di penelitian tugas akhir ini.

## BAB V Kesimpulan dan Saran

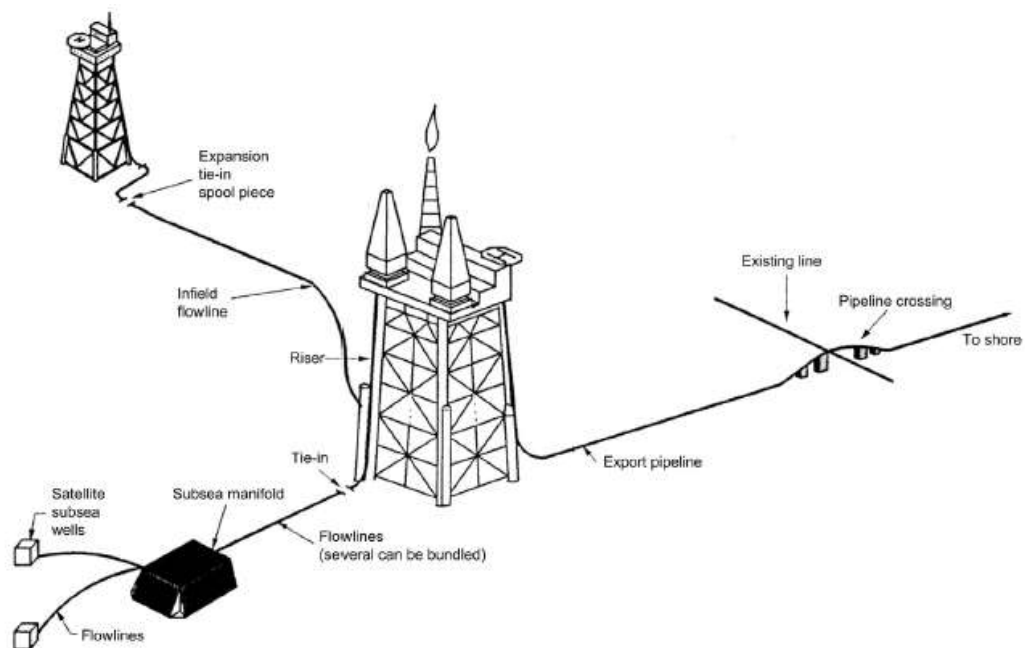
Bab ini menjelaskan tentang kesimpulan yang telah didapatkan dari hasil eksperimen pada tugas akhir ini dan saran-saran penulis sebagai pertimbangan dalam keperluan penelitian selanjutnya.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

#### 2.1 Tinjauan Pustaka

Dalam dunia kelautan, sistem perpipaan bawah laut (*subsea pipeline*) digunakan untuk moda transportasi pendistribusian gas dan minyak dari *offshore platform* ke tempat produksi (Sumer & Fredsøe, 2002). Minyak dan gas berasal dari *reservoir* yang terletak di bawah lapisan tanah. Setelah *reservoir* tersebut terdeteksi, selanjutnya akan dilakukan pengeboran (*drilling*) sebagai langkah awal dimulainya kegiatan eksploitasi minyak mentah dan gas alam tersebut. Setelah dilakukan pengeboran, *conductor* akan diturunkan untuk mengangkut fluida tersebut ke atas *platform*. Untuk proses pengolahan atau produksi fluida tersebut bisa dilakukan di *platform* itu sendiri, ada yang disalurkan ke *platform* lain dan ada juga yang diolah atau diproduksi di *onshore*. Dan alat yang digunakan untuk menyalurkan fluida tersebut adalah *subsea pipeline*. Hal ini dikarenakan jaringan pipa bawah laut merupakan media transportasi yang efektif dan ekonomis untuk pengangkutan minyak dan gas alam (Gao & Jeng, 2005). Berikut adalah gambar ilustrasi penyaluran atau pendistribusian fluida.



Gambar 2.1 Proses penyaluran fluida dengan *subsea pipelines*  
(Bai & Bai, 2014)

Sejak pertama kali digunakan di *Gulf Mexico*, *subsea pipeline* kemudian digunakan di daerah Mediterania, Australia, Asia Tenggara dan Amerika Latin (Mouselli, 1981). Indonesia, sebagai salah satu negara Asia Tenggara memiliki 530 *offshore platform* dan jaringan pipa bawah laut yang tersebar di berbagai wilayah perairan Indonesia. Namun, pada berbagai tempat, aturan dan standar tentang penggelaran pipa belum sepenuhnya dilaksanakan dengan baik (Suntoyo, 2016).

Salah satu permasalahan yang sering terjadi pada *subsea pipeline* adalah penggerusan tanah (*scouring*). Adanya struktur pipa itu sendiri yang akan mengubah pola aliran arus di lingkungan terdekatnya. Berubahnya pola aliran ini akan mengakibatkan adanya kontraksi, pembentukan *vortex*, turbulensi, terjadinya gelombang pecah, difraksi dan refleksi yang memungkinkan adanya material yang terbawa oleh arus. Semakin banyak material yang terbawa arus akan menyebabkan terjadinya bentangan bebas (*free span*). Apabila hal ini dibiarkan, akan mengakibatkan ketidakstabilan pipa sehingga dapat memicu kegagalan yang mengancam kerusakan lingkungan dan kerugian materiil. Oleh karena itu, perhitungan *scouring* harus dipertimbangkan dalam proses desain pipa. Selain itu, diperlukan juga adanya pemeriksaan atau inspeksi berkala untuk mencegah terjadinya kegagalan pada struktur pipa.

Banyak penelitian yang dilakukan untuk membahas masalah *scouring* pada pipa. Kjeldsen *et al.* (1973) adalah orang pertama yang melakukan eksperimen tentang *scouring* dengan mendapatkan nilai kedalaman maksimum *scouring* pada suatu lokasi. Mao (1986) menjelaskan tentang aliran *vortex* yang terbentuk di sekitar pipa. Kemudian Sumer dan Fredsøe (1991) melakukan eksperimen untuk menentukan *critical conditions* pada pipa akibat gelombang reguler yang menghasilkan dua parameter yaitu bilangan Keulegan – Carpenter (KC) dan rasio  $e/D$ . Kemudian pada tahun 2001, Sumer dan Fredsøe telah berhasil menemukan formula empiris untuk menghitung kedalaman *scouring* akibat kombinasi antara gelombang dan arus. Selain peneliti tersebut, Suntoyo dkk. (2016) baru-baru ini telah berhasil mengembangkan model tegangan geser dasar secara akurat, yaitu laju sedimen dasar akibat pergerakan gelombang ireguler dan aplikasinya ke perubahan morfologi pantai.

Penelitian *scouring* pada *subsea pipeline* juga pernah dilakukan oleh beberapa mahasiswa Jurusan Teknik Kelautan ITS Surabaya, diantaranya Nugroho (2011) yang menganalisa *scouring* pipa bawah laut Kodeco jalur Poleng – Gresik dengan variasi tipe tanah. Dari penelitian tersebut, dapat diketahui daerah mana saja yang rawan terjadinya *scouring*. Semakin kecil diameter butiran tanah, maka semakin mudah terjadinya *scouring*.

Selain itu, Pebriantina (2016) melakukan pemodelan 2D *scouring* pada pipa dengan variasi diameter pipa dan kondisi *in-trench*. Penelitian tersebut menghasilkan kesimpulan bahwa semakin besar diameter pipa, kedalaman dan lebar *scouring* juga semakin besar. Budiarti (2016) juga melakukan penelitian tentang pemodelan numerik profil 2D *scouring* pada pipa bawah laut kondisi meletak dengan variasi jarak *clearance* terhadap dasar laut. Penelitian tersebut menghasilkan kesimpulan bahwa nilai kedalaman *scouring* akan menurun akan semakin menurun seiring bertambahnya nilai  $e$  (*gap/clearance*).

## 2.2 Dasar Teori

### 2.2.1 *Scouring*

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, *scouring* merupakan fenomena penggerusan lapisan tanah (*seabed*) yang terjadi di sekitar struktur. *Scouring* terjadi karena adanya struktur itu sendiri yang merubah pola aliran di lingkungan sekitarnya. Berubahnya pola aliran dapat menyebabkan kontraksi aliran, pembentukan *vortex*, turbulensi, refleksi dan difraksi gelombang, gelombang pecah dan perbedaan tekanan pada tanah yang menyebabkan adanya material yang terbawa oleh arus.

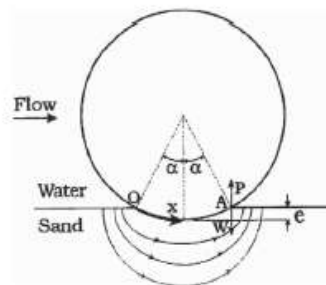
Ketika diletakkan pada dasar laut (*seabed*), struktur pipa akan dikenakan gaya akibat arus dan gelombang. Hal ini yang menyebabkan adanya perbedaan tekanan antara bagian depan pipa (*upstream*) dengan bagian belakang pipa (*downstream*). Tekanan akan mengalir dari yang tinggi (*upstream*) ke yang rendah (*downstream*). Gradien tekanan tersebut akan menimbulkan aliran rembesan (*seepage flow*) yang mengalir dari bawah pipa dan menggerus lapisan tanah. Ada tiga macam *scouring* pada struktur

pipa. Berikut adalah macam-macam *scouring* yang terjadi pada struktur pipa berdasarkan Sumer dan Fredsøe (2002).

a. *Onset of Scour*

*Onset of Scour* ini berhubungan dengan aliran rembesan (*seepage flow*). Struktur pipa yang diletakkan pada dasar laut, akan dikenakan gaya akibat arus dan gelombang. Hal inilah yang mengakibatkan perbedaan tekanan antara bagian *upstream* dan *downstream* pada pipa. Perbedaan tekanan inilah yang menyebabkan timbulnya *seepage flow* di bawah pipa. Ketika kecepatan arus meningkat, aliran rembesan (*seepage flow*) tidak hanya menggerus di bagian bawah pipa, namun juga pada bagian *downstream*. Hal tersebut akan membuat sedimen menumpuk, sehingga permukaan tanah pada bagian *downstream* naik. Kemudian sedimen yang menumpuk tersebut akan hancur (tergerus) oleh campuran air dan pasir. Proses inilah yang dinamakan *piping*, yang lebih dikenal dengan mekanika tanah yang dapat menyebabkan kegagalan pada struktur, seperti pipa (Terzaghi & Peck, 1948).

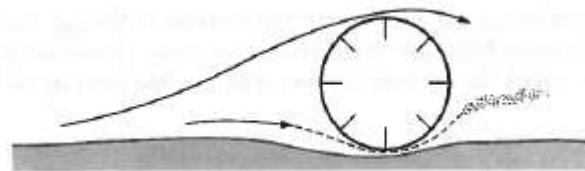
Sumer dan Fredsøe juga meneliti *onset of scour* akibat gelombang. Terdapat dua gaya yaitu *agitating force* (*seepage force*) dan *resisting force* (berat tanah). Kondisi kritis akan terjadi apabila *seepage force* ( $P$ ) melebihi berat tanah ( $W$ ). Berikut adalah ilustrasi gambar *seepage flow* di bawah pipa.



Gambar 2.2 *Seepage flow* di bawah struktur pipa  
(Sumer & Fredsøe, 2002)

b. *Tunnel Erosion*

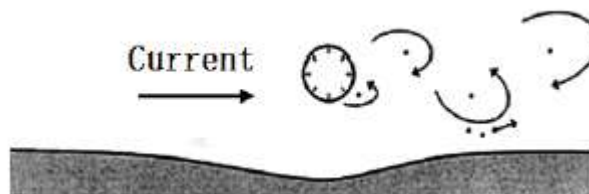
*Tunnel erosion* atau *tunnel scour* terjadi di bawah pipa. Pada tahapan awal, terdapat celah (*gap*) kecil antara *seabed* dengan pipa, dengan kata lain  $e \ll D$ , dengan  $D$  adalah diameter pipa. Celah tersebut akan terisi oleh air sehingga *gap* menjadi lebih besar. Kecepatan aliran yang pada *gap* tersebut akan menghasilkan gaya geser yang sangat besar pada bagian bawah pipa. Pada akhirnya, kecepatan aliran akan semakin berkurang dan *gap* menjadi lebih besar karena adanya gesekan tersebut. *Tunnel erosion* tahapan awal pembentukan lubang *scouring*, kemudian akan diikuti oleh *lee-wake erosion* yang akan menggerus bagian bawah pipa sehingga terbentuklah *free span*.



Gambar 2.3 *Tunnel erosion* di bawah struktur pipa  
(Sumer & Fredsøe, 2002)

c. *Lee-wake Erosion*

*Lee-wake erosion* atau *lee-wake scour* terjadi pada bagian *downstream* (bagian belakang pipa). Ketika *gap* antara *seabed* dan pipa mencapai kritis, *vortex-shedding* akan terjadi di belakang pipa. *Scour* akan dikendalikan oleh *vortex-shedding*. Tahap ini yang dinamakan *lee-wake erosion*, dimana kapasitas transpor sedimen meningkat akibat meningkatnya gaya geser.



Gambar 2.4 *Lee-wake erosion* pada struktur pipa  
(Sumer & Fredsøe, 2002)

Pada akhirnya, proses penggerusan mencapai kondisi tetap (*equilibrium stage*). Pada tahapan ini, gaya geser disepanjang *seabed* di bawah pipa adalah konstan. Ini berarti banyaknya sedimen yang masuk ke lubang *scour* sama dengan banyaknya sedimen yang keluar dari lubang *scour* tersebut.

*Scouring* juga akan menyebabkan penurunan kapasitas tahanan pasif tanah terhadap gaya lateral dan momen. Gerusan yang terjadi dapat dikelompokkan sebagai berikut.

1. Gerusan Global, yaitu tipe gerusan yang terjadi pada keseluruhan lokasi struktur.
2. Gerusan Lokal, yaitu tipe gerusan yang pada umumnya terjadi di sekitar satu elemen struktur. Ada dua macam tipe gerusan lokal yang umum diketahui, yaitu :

- *Clear Water Scouring*

Jenis *scouring* ini terjadi pada kondisi dimana tidak ada material yang ikut terangkut oleh aliran air. Pada kondisi ini, nilai dari Shield Parameter lebih kecil daripada nilai critical-nya ( $\theta < \theta_{cr}$ ).

- *Live Bed Scouring*

Jenis *scouring* ini terjadi pada kondisi dimana material atau sedimen yang berada di dasar laut ikut tersangkut oleh aliran air. Pada kondisi ini berlaku nilai  $\theta > \theta_{cr}$  , dimana formula untuk menghitung *Shield Parameter* adalah sebagai berikut.

$$\theta = \frac{U_{fm}^2}{g(s-1)d_{50}} \quad (2.1)$$

Dengan,

$$s = \frac{\rho_s}{\rho} \quad (2.2)$$



$$U_{fm} = \sqrt{\frac{\tau_{\infty}}{\rho}} \quad (2.3)$$

Keterangan :

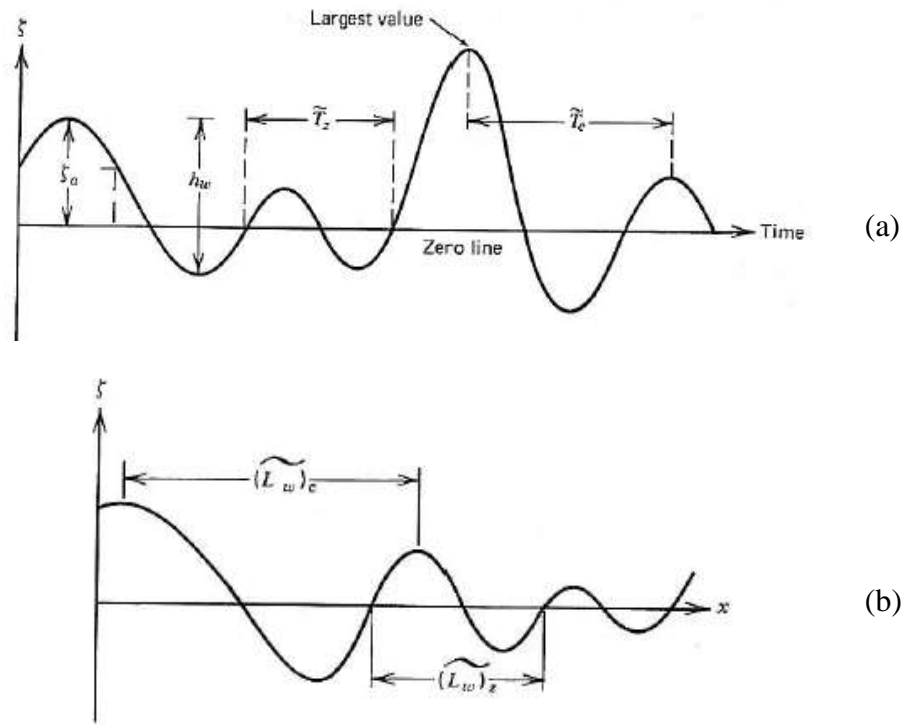
- $U_{fm}$  = *undisturbed bed shear velocity* (m/s)
- $g$  = percepatan gravitasi (m/s<sup>2</sup>)
- $s$  = *specific gravity* sedimen dasar
- $d_{50}$  = ukuran butiran sedimen lolos ayakan 50 % (m)
- $\tau_{\infty}$  = tegangan geser dasar untuk aliran  
*Undisturbed* (N/m<sup>2</sup>)

Lim & Chiew (1996) menjelaskan bahwa untuk mendapatkan kedalaman *scouring* yang mendekati kondisi lapangan, maka perhitungannya didasarkan pada kondisi *live bed*, yaitu kondisi yang memperhitungkan adanya *sediment transport* berupa deposisi.

### 2.2.2 Gelombang Ireguler

Bentuk gelombang pada kondisi sebenarnya di lautan adalah acak atau ireguler. Gelombang ireguler bervariasi terhadap waktu dan tempat, tergantung pada kecepatan angin. Hal ini yang membuat dalam satu deret gelombang memiliki tinggi dan periode yang berbeda-beda. Menurut Bhattacharyya (1972), gelombang ireguler memiliki ciri-ciri sebagai berikut :

1. Permukaan gelombang merupakan permukaan yang tidak beraturan.
2. Permukaan gelombang yang tidak beraturan selalu berubah dari waktu ke waktu dan bervariasi dari tempat ke tempat, tergantung oleh kecepatan angin.
3. Pada setiap interval, pola gelombang ireguler tidak pernah berulang (selalu berubah).



Gambar 2.5 Gelombang ireguler terhadap (a) waktu dan (b) tempat (Bhattacharyya, 1972)

Dalam perhitungan kedalaman dan lebar *scouring*, parameter yang dibutuhkan adalah frekuensi ( $\omega$ ) dan *wave number* ( $k$ ) untuk menghitung *orbital velocity*. Berikut adalah rumus perhitungan  $\omega$  dan  $k$ .

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2.4)$$

Atau juga dapat dihitung dengan rumus berikut.

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) \quad (2.5)$$

Namun, untuk menghitung  $U_m$ , frekuensi yang dipakai adalah frekuensi pada puncak spektrum JONSWAP,  $\omega_p$  (*spectral peak frequency*) dengan rumus yang hampir sama seperti Persamaan 2.4 dan 2.5, sebagai berikut.

$$\omega_p = \frac{2\pi}{T_p} \quad (2.6)$$

$$\omega_p^2 = gk_p \tanh(k_p h) \quad (2.7)$$

k dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut.

$$k_p = \frac{2\pi}{\lambda_p} \quad (2.8)$$

Dengan,

$\omega$  = frekuensi (Hz)

$\omega_p$  = frekuensi pada puncak spektrum (Hz)

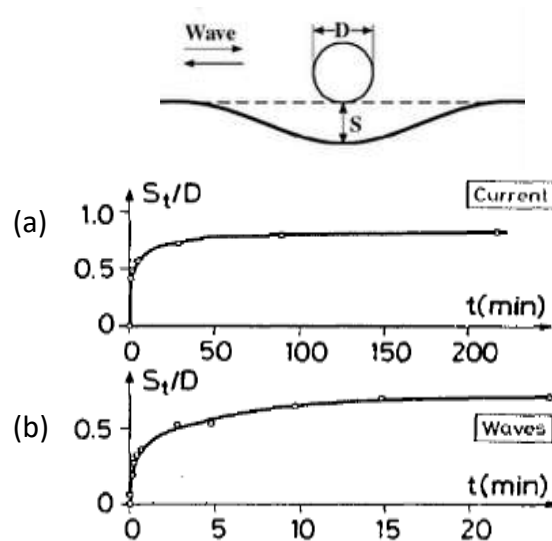
$h$  = kedalaman perairan (m)

$k_p$  = wave number ( $m^{-1}$ )

$\lambda_p$  = panjang gelombang (m)

### 2.2.3 Kedalaman Scouring

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, pipa yang diletakkan di atas *seabed* akan mengalami *scouring* akibat adanya arus dan gelombang. Pada awal pembentukan *scouring*, akan muncul *gap* antara pipa dengan *seabed*. Kemudian *gap* tersebut akan semakin membesar hingga membentuk gerusan yang dalam. Kedalaman *scouring* akan terus berkembang hingga mencapai kesetimbangan (*equilibrium stage*) atau biasa yang disebut dengan *equilibrium scour depth* sesuai dengan ilustrasi berikut.



Gambar 2.6 Time development kedalaman scour, (a) Arus,  $\theta = 0,098$  (Mao, 1986), (b) Gelombang,  $\theta = 0,035$ ,  $KC = 27$  (Fredsoe & Deigaard, 1992)

Formula yang digunakan untuk menghitung kedalaman *scouring* pada pipa bawah laut memiliki variasi terhadap penyebab terjadinya *scouring*. Pengaruh gelombang ireguler pada *scouring* telah diteliti oleh Sumer dan Fredsøe (1996) dengan metode eksperimen. Dalam pengukurannya, Sumer dan Fredsøe menggunakan spektrum JONSWAP. Bilangan KC pada kasus gelombang ireguler didefinisikan dengan beberapa cara seperti berikut.

$$KC = U_m T_z / D ; U_m T_s / D ; U_m T_p / D ; U_s T_z / D ; U_s T_s / D ; U_s T_p / D$$

Namun, Sumer dan Fredsøe telah membandingkan hasil antara kedalaman *scouring* akibat gelombang ireguler dan kedalaman *scouring* akibat gelombang reguler. Mereka menemukan rumus perhitungan KC yang terbaik untuk gelombang ireguler sebagai berikut.

$$KC = \frac{U_m T_p}{D} \quad (2.9)$$

Dalam perhitungan kedalaman dan lebar *scouring*, parameter yang dibutuhkan adalah *orbital velocity* yang didapatkan dengan rumus sebagai berikut.

$$U_m = \sqrt{2} U_{rms} \quad (2.10)$$

Dengan,

$$U_{rms} = \omega_p \cdot A_{rms} \quad (2.11)$$

Nilai A (*orbital amplitude*), dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut.

$$A_{rms} = \frac{H_{rms}}{2 \sinh k_p d} \quad (2.12)$$

Dengan,

$U_m$  = kecepatan orbital maksimum (m/s)

$U_{rms}$  = kecepatan orbital rms (m/s)

$T_p$  = periode pada puncak spektrum (s)

$\omega_p$  = frekuensi pada puncak spektrum (Hz)

$D$  = diameter luar pipa (m)

$A_{rms}$  = *orbital amplitude* rms (m)

$H_{rms}$  = tinggi gelombang rms (m)

$k_p$  = *wave number* ( $m^{-1}$ )

$d$  = kedalaman perairan (m)

Selain bilangan KC, kedalaman *scouring* juga tergantung pada nilai  $e/D$  (*burial depth-diameter ratio*). Rumus perhitungan kedalaman *scour* untuk gelombang ireguler mengacu pada penelitian Etemad-Shahidi *et al.* (2010) sama dengan rumus perhitungan kedalaman *scour* untuk kondisi gelombang saja. Berikut adalah rumus perhitungan kedalaman *scouring* tersebut.

- Untuk  $e/D > 0,145$

$$\frac{S_m}{D} = 0,024 KC^{0,763} \exp\left(-0,631 \frac{e}{D}\right) \quad (2.13)$$

- Untuk  $e/D \leq 0,145$

$$\frac{S_m}{D} = 0,105 KC^{0,503} \exp\left(-0,284 \frac{e}{D}\right) \quad (2.14)$$

#### 2.2.4 Lebar *Scouring*

Besar lebar *scouring* tergantung pada nilai bilangan Keulegan-Carpenter (KC). Semakin besar nilai KC, maka semakin besar lebar *scouring* yang dihasilkan. Berikut adalah rumus untuk menghitung lebar *scouring*.

$$\frac{W}{D} = 0,35 KC^{0,65} \quad (2.15)$$

Dengan  $W$  adalah lebar *scouring* yang diukur dari ujung lubang *scour* pipa sebelah kiri hingga ujung lubang *scour* pipa sebelah kanan.

### 2.2.5 Laju Propagasi *Scouring*

Dalam penelitiannya, Cheng *et al.* (2009) telah berhasil menemukan formula untuk perhitungan laju propagasi *scouring* sepanjang pipa. Berikut adalah formula tersebut.

$$V_h = K_w \left( 1 - \frac{e}{D} (1 + \sin \alpha) \right) \frac{\sqrt{g(s-1)d_{50}^3}}{D \tan \phi} \theta_w^{5/3} \sqrt{KC} \quad (2.16)$$

Dengan,

$K_w$  = konstanta, 11,3 (*wave only*)

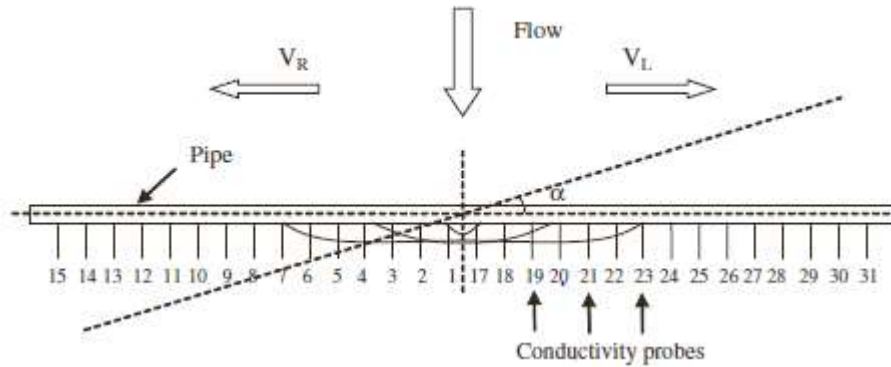
$\alpha$  = sudut datang gelombang

$T_p$  = periode pada puncak spektrum (s)

$\phi$  = sudut *slope*

$\theta_w$  = *shield parameter (wave only)*

Pada eksperimen yang dilakukan oleh Cheng *et al.* (2009), laju propagasi juga mempunyai arah. Berikut adalah gambar ilustrasi laju propagasi sepanjang pipa.



Gambar 2.7 Laju propagasi *scouring* arah ke kanan ( $V_R$ ) dan ke kiri ( $V_L$ ) pipa (Cheng *et al.*, 2009)

### 2.2.6 Pengaruh Posisi Pipa

Dalam instalasinya, pipa ada yang diposisikan meletak pada *seabed*, ada juga yang dikubur (*in-trench*). Sumer dan Fredsøe (1990) melakukan

eksperimen tentang pengaruh *gap clearance*,  $e$  (m) antara pipa dengan *seabed* terhadap *scouring* dengan menggunakan gelombang. Pengujian ini hampir sama dengan yang dilakukan Hansen *et al.* (1986), hanya saja menggunakan arus tetap. Pada pengujian tersebut, posisi pipa juga ada yang terkubur sebagian (nilai  $e$  negatif). Penelitian ini menghasilkan sebuah rumus empiris yang digunakan untuk kondisi tertentu sebagai berikut.

- Untuk  $-0,25 \leq e/D \leq 1,2$

$$\frac{S_m}{D} = 0,625 \exp\left(-0,6 \frac{e}{D}\right) \quad (2.17)$$

- Untuk  $0 \leq e/D \leq 2$

$$\frac{S_m}{D} = 0,1 \sqrt{KC} \exp\left(-0,6 \frac{e}{D}\right) \quad (2.18)$$

Persamaan 2.17 digunakan untuk perhitungan kedalaman *scouring* pada yang terjadi akibat *steady currents*, sedangkan persamaan 2.18 untuk yang terjadi akibat pengaruh gelombang. Berdasarkan PM 68 Tahun 2011 Pasal 25 Ayat 2b, alur pelayaran dengan kedalaman laut kurang dari 20 meter, kabel laut dan pipa bawah laut harus dipendam 4 meter dibawah permukaan dasar (*natural seabed*). Sedangkan Keputusan Menteri Pertambangan dan Energi Nomor 300.K/38/M.PE/1997 tentang Keselamatan Kerja Pipa Penyalur Minyak Dan Gas Bumi Pasal 13 mengatakan Pipa Penyalur yang digelar di laut wajib memenuhi ketentuan sebagai berikut :

- a. Dalam hal kedalaman dasar laut kurang dari 13 meter maka pipa harus ditanam sekurang-kurangnya 2 (dua) meter di bawah dasar laut (*sea bed*), serta dilengkapi dengan sistem pemberat agar pipa tidak tergeser atau
- b. Dalam hal kedalaman dasar laut 13 meter atau lebih maka pipa dapat diletakkan di dasar laut, serta dilengkapi dengan sistem pemberat agar pipa tidak tergeser atau berpindah.

### 2.2.7 Pemodelan Fisik

Dalam melakukan eksperimen di laboratorium, diperlukan adanya pemodelan fisik. Pemodelan fisik dapat dikatakan sebagai pembuatan model berupa *prototype* dengan ukuran yang lebih kecil dengan prinsip kesebangunan. Kesebangunan yang dimaksud adalah berupa sebangun geometrik, sebangun kinematik dan sebangun dinamik (Darwis, 2014). Pada kasus *scouring*, penentuan *scale* mengacu pada *Froude number* dan *Reynolds number*. *Froude number* sering digunakan dalam permasalahan gelombang, sedangkan *Reynolds number* berperan dalam permasalahan aliran fluida. Namun, pemodelan yang mengacu pada *Reynolds number* tidak bisa diaplikasikan pada laboratorium. Hal ini dikarenakan adanya pengaruh massa jenis fluida dan kekentalan fluida yang tidak bisa dimodelkan pada laboratorium pengujian.

Dalam aturan keserupaan berdasarkan Froude, harus memenuhi kriteria persamaan sebagai berikut.

$$Fr = \frac{u_p^2}{gl_p} = \frac{u_m^2}{gl_m} \quad (2.19)$$

Dengan,

$u_p$  = kecepatan fluida pada *prototype* (m/s)

$u_m$  = kecepatan fluida yang dimodelkan (m/s)

$l_p$  = panjang pada *prototype* (m)

$l_m$  = panjang yang dimodelkan (m)

$g$  = percepatan gravitasi (m/s<sup>2</sup>)

Model yang akan diuji, harus dikecilkan terlebih dahulu dari ukuran yang sesungguhnya untuk menyesuaikan dengan kapasitas tempat eksperimen.

$$l_p = \lambda l_m \quad (2.20)$$



Dalam aturan Froude, panjang yang sebenarnya akan dikalikan dengan faktor skala ( $\lambda$ ) untuk menghasilkan model yang akan digunakan dalam eksperimen. Hal ini akan berdampak pada persamaan 2.19 , sehingga untuk menentukan kecepatan yang akan dimodelkan adalah sebagai berikut.

$$u_p = \sqrt{\lambda}u_m \quad (2.21)$$

Hal yang sama juga dilakukan untuk memodelkan variabel yang lain dengan menggunakan aturan Froude. Selain variabel geometri, variabel kinematik dan dinamik juga bisa dimodelkan dengan aturan Froude. Sehingga, dengan cara yang sama seperti penentuan persamaan 2.21 , dapat diperoleh rumus untuk memodelkan gelombang sebagai berikut.

$$H_{pro} = \lambda H_{mod} \quad (2.22)$$

$$T_{pro} = \sqrt{\lambda}T_{mod} \quad (2.23)$$

Dengan,

$H_{pro}$  = Tinggi gelombang pada *prototype* (m)

$H_{mod}$  = Tinggi gelombang yang dimodelkan (m)

$T_{pro}$  = Periode gelombang pada *prototype* (s)

$T_{mod}$  = Periode gelombang yang dimodelkan (s)

Besar faktor skala ( $\lambda$ ) yang digunakan harus sama semua dalam pemodelan. Apabila besar faktor skala untuk panjang struktur adalah 0,2 , maka besar faktor skala yang digunakan untuk pemodelan gelombang juga harus 0,2.

### 2.2.8 Parameter Tak Berdimensi

Terdapat lima parameter tak berdimensi yang digunakan untuk analisa *scouring* pada eksperimen ini, yaitu bilangan Keulegan Carpenter (KC), *wave steepness parameter*, *burial depth-diameter ratio* ( $e/D$ ), *mobility*

*parameter* ( $\Psi$ ) dan *shield parameter* ( $\theta$ ). Bilangan Keulegan Carpenter juga disebut angka periode, ialah suatu bilangan non dimensional yang mendeskripsikan hubungan antara gaya drag dengan gaya inerti yang menggerakkan objek dalam aliran fluida (Fredsoe, 2002). Nilai KC dapat dihitung dengan menggunakan rumus yang sama dengan persamaan 2.9 sebelumnya.

*Wave steepness parameter* merupakan parameter non dimensional untuk mengetahui pengaruh gelombang terhadap *scouring* dengan rumus sebagai berikut.

$$\text{Wave steepness parameter} = \frac{H}{g T^2} \quad (2.24)$$

*Mobility parameter* ( $\Psi$ ) merupakan parameter tak berdimensi yang mendeskripsikan hubungan antara pengaruh karakteristik gelombang terhadap besar butiran sedimen (Testik *et al.*, 2009). Rumus perhitungan  $\Psi$  dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\Psi = \frac{U_m^2}{g d_{50}(s - 1)} \quad (2.25)$$

Dengan,

$g$  = gaya gravitasi ( $\text{m/s}^2$ )

$d_{50}$  = diameter butiran sedimen lolos ayakan 50 % (mm)

*Shield parameter* ( $\theta$ ) merupakan parameter non dimensional yang berhubungan dengan pergerakan sedimen. Kekasaran sedimen sangat mempengaruhi pergerakan sedimen pada saat *scouring*. Soulsby (1997) telah menemukan formula untuk menghitung *shield parameter* pada kondisi hanya terdapat gelombang saja.

$$\theta_w = \frac{\tau_w}{\rho g(s - 1)d_{50}} \quad (2.26)$$

Dengan,  $\tau_w$  adalah *wave-induced shear stress* pada dasar yang dapat diperoleh dengan rumus sebagai berikut.

$$\tau_w = \frac{1}{2} \rho f_w U_m^2 \quad (2.27)$$

Dengan,  $f_w$  adalah *friction factor* yang dapat diperoleh dengan rumus sebagai berikut.

$$f_w = 0,237 \left( \frac{A}{k_s} \right)^{-0,52} \quad (2.28)$$

Dengan A adalah amplitudo gerakan orbital dan  $k_s$  adalah kekasaran pasir yang dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$A = \frac{U_m T_p}{2\pi} \quad (2.29)$$

$$k_s = 2,5 d_{50} \quad (2.30)$$

### 2.2.9 Pengujian *Specific Gravity* dan Ayakan Tanah

Sebelum menghitung *Specific Gravity* dari tanah tersebut, ada empat komponen yang harus diketahui, yaitu berat piknometer ( $W_1$ ), berat piknometer dan tanah kering ( $W_2$ ), berat piknometer, tanah dan air ( $W_3$ ) dan berat piknometer dan air ( $W_4$ ). Berikut adalah langkah-langkah yang dilakukan untuk mencari empat komponen tersebut.

- Sebelum diuji, *oven* terlebih dahulu tanah yang akan digunakan sebagai *sample* dengan suhu  $105^\circ - 110^\circ \text{ C}$  selama 24 jam.
- Siapkan dua buah piknometer.
- Bersihkan piknometer dan timbang beratnya menggunakan timbangan digital, berat tersebut merupakan  $W_1$ .
- Masukkan tanah kering yang sudah di-*oven* kurang lebih 100 gram kedalam dua piknometer tersebut dan timbang, berat tersebut merupakan  $W_2$ .
- Tambahkan air suling secukupnya pada kedua piknometer tersebut, minimal hingga pasir tersebut terendam air.

- Hilangkan udara-udara yang terperangkap pada tanah tersebut dengan menggunakan *vacum pump*, hingga tidak ada gelembung yang keluar. Pada pengujian ini, waktu yang dibutuhkan untuk menghilangkan gelembung adalah selama 20 menit.
- Tambahkan air suling sampai pada garis yang ada di kedua piknometer tersebut. Bersihkan bagian luarnya dengan kain lap dan timbang, berat tersebut merupakan  $W_3$ .
- Kemudian ukur suhu menggunakan termometer pada kedua piknometer tersebut.
- Buang pasir dan air yang ada dalam kedua piknometer tersebut. Kemudian isi dengan air suling kembali hingga mencapai garis yang ada pada kedua piknometer tersebut, bersihkan bagian luarnya menggunakan kain lap dan timbang, berat tersebut merupakan  $W_4$ .
- Kemudian ukur suhu menggunakan termometer pada kedua piknometer tersebut.

Setelah semua komponen ( $W_1$ ,  $W_2$ ,  $W_3$  dan  $W_4$ ) telah diketahui, untuk mendapatkan nilai dari *Specific Gravity* dapat menggunakan rumus sebagai berikut.

$$GS = \frac{W_2 - W_1}{(W_4 - W_1) - (W_3 - W_2)} \quad (2.31)$$

Dengan,

- $W_1$  = berat piknometer (gram)
- $W_2$  = berat piknometer + tanah kering (gram)
- $W_3$  = berat piknometer + tanah + air (gram)
- $W_4$  = berat piknometer + air (gram)

$$GS(\text{ at } 27^\circ\text{C} ) = GS(\text{ at } T1^\circ\text{C} ) \times A \quad (2.32)$$

Dengan,

A = Faktor koreksi, sebesar 0,9986

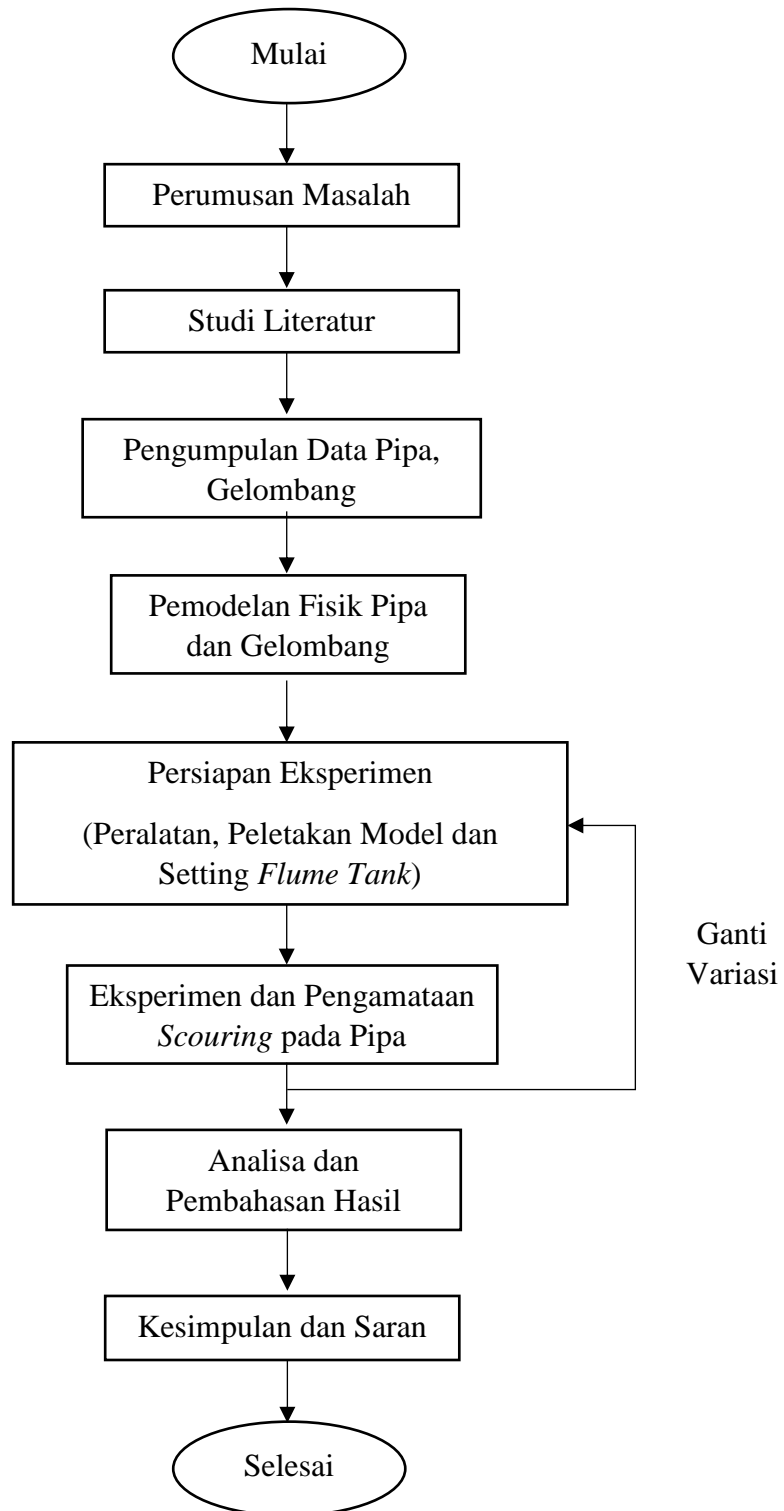
Pengujian selanjutnya adalah pengujian ayakan (*sieve analysis*) Pengujian ayakan bertujuan untuk mengetahui nilai dari  $d_{50}$  dari *sample* tanah/pasir yang diuji. *Sample* tanah yang akan diuji, dimasukkan ke *oven* terlebih dahulu selama satu hari (24 jam). Setelah itu, *sample* tersebut direndam dalam air selama 24 jam, kemudian dimasukkan kedalam *oven* lagi untuk dikeringkan.

Pada pengujian ini, ada empat ayakan yang digunakan, yaitu ayakan no. 10, ayakan no. 20, ayakan no. 40 dan ayakan no. 100. *Sample* tanah yang sudah dikeringkan tersebut, dimasukkan kedalam ayakan yang sudah diurutkan dari nomor yang paling kecil diatas, hingga nomor yang paling besar dibawah. Setelah *sample* dimasukkan, ayakan tersebut digoyang-goyangkan selama 10 menit. Kemudian dilakukan analisa mengenai berat yang tertahan dan berat yang lolos untuk menghasilkan grafik yang nantinya digunakan untuk mencari nilai dari  $d_{50}$ .

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir

### 3.2 Prosedur Penelitian

Berdasarkan diagram alir penelitian diatas, dapun prosedur penelitian dan langkah-langkah penelitian dalam mencapai tujuan Tugas Akhir ini dijelaskan sebagai berikut:

1. Perumusan Masalah

Langkah awal sebelum studi eksperimen ini dilakukan adalah menentukan rumusan masalah yang akan diangkat.

2. Studi Literatur

Langkah yang dilakukan selanjutnya adalah studi dan pengumpulan literatur sebagai bahan referensi dan teori yang diperlukan dalam penyelesaian studi eksperimen tugas akhir ini.

3. Pengumpulan Data

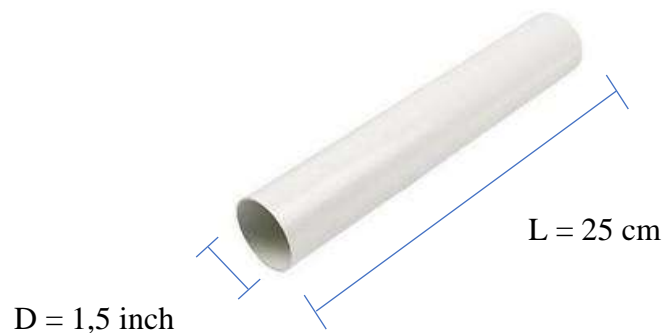
Data yang dibutuhkan pada studi eksperimen ini berupa data ukuran pipa dan data lingkungannya, mulai yaitu data gelombang dan data tanah.

4. Pemodelan Fisik

Sebelum dilakukan eksperimen, benda yang akan diuji harus dilakukan pemodelan fisik terlebih dahulu dengan skala yang disesuaikan dengan tempat pengujian agar pengujian tersebut bisa dilakukan. Pipa yang digunakan sebagai model dalam eksperimen adalah pipa PVC dengan skala geometri adalah 1:10. Namun, apabila ukuran diameter pipa yang sesungguhnya ditinjau adalah 16 inch, ukuran diameter pipa PVC sebesar 1,6 inch tidak ada di pasaran. Ukuran diameter pipa PVC yang mendekati di pasaran adalah 1,5 inch, sehingga faktor skala ( $\lambda$ ) yang digunakan adalah sebesar **1,5/16**. Sedangkan panjang yang digunakan adalah 25 cm. Dan untuk pasir yang digunakan berasal dari pasir pantai.

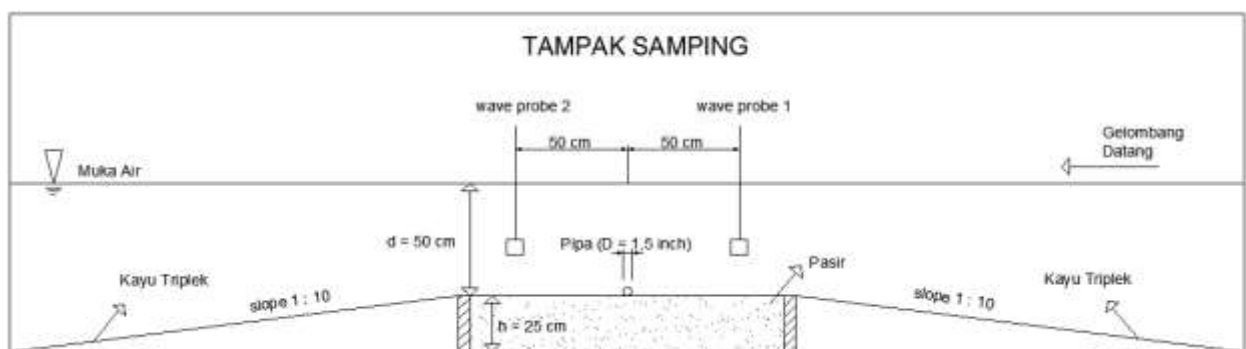


Ukuran pipa yang digunakan dalam eksperimen ini hampir sama dengan eksperimen yang dilakukan oleh Gao dan Jeng dalam penelitian yang berjudul *A New Design for Wave-Induced Pipeline Stability on a Sandy Seabed*. Ukuran pipa yang digunakan Gao dan Jeng berdiameter 0,030 m dan panjang 19 cm. Sedangkan untuk ukuran butiran  $d_{50}$  tanahnya yaitu 0,38 mm. Dari penelitian yang dilakukan Gao dan Jeng tersebut sangat memungkinkan terjadinya *scouring*.

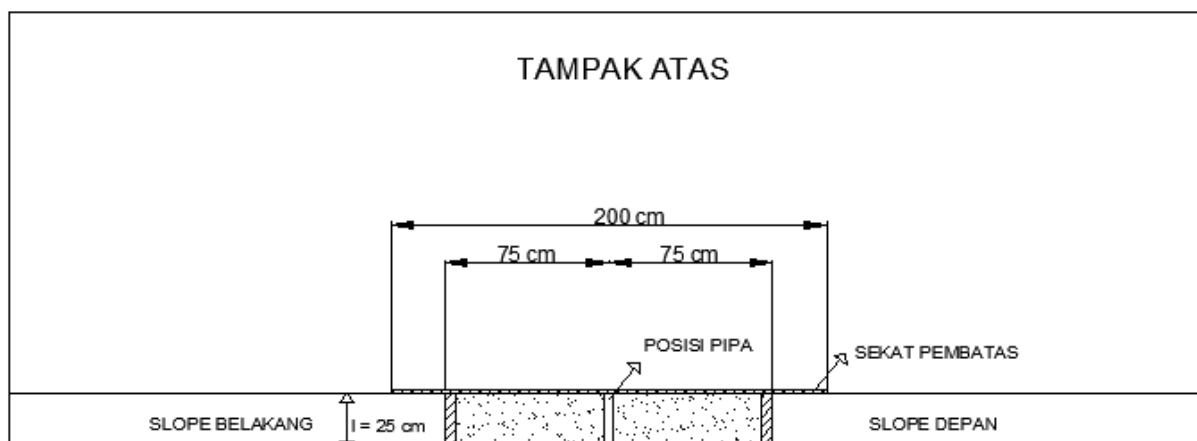


Gambar 3.2 Ukuran diameter model pipa yang digunakan

Eksperimen ini akan diuji dengan sketsa sebagai berikut.



Gambar 3.3 Sketsa pengujian tampak samping



Gambar 3.4 Sketsa pengujian tampak atas

Penentuan variasi tinggi gelombang untuk gelombang ireguler berdasarkan kemampuan dari *flume tank* untuk membangkitkan gelombang. Dalam penelitian ini, terdapat 12 variasi yaitu 3 variasi  $H_i$  (tinggi gelombang) dan 4 variasi kondisi peletakan pipa ( $e/D$ ) mulai dari meletak dan terkubur. Dalam penelitian ini, periode ( $T_i$ ) tidak divariasikan (1 detik). Berikut adalah rincian variasi yang dilakukan pada penelitian ini.

Tabel 3.1 Variasi eksperimen yang akan dilakukan

Eksperimen ke-	$T_i$ (detik)	$H_i$ (cm)	Kondisi Peletakan
1	1	7	Meletak
2	1	6	Meletak
3	1	5	Meletak
4	1	7	<i>In-Trench</i> 2 mm
5	1	6	<i>In-Trench</i> 2 mm
6	1	5	<i>In-Trench</i> 2 mm
7	1	7	<i>In-Trench</i> 3 mm
8	1	6	<i>In-Trench</i> 3 mm
9	1	5	<i>In-Trench</i> 3 mm
10	1	7	<i>In-Trench</i> 4 mm
11	1	6	<i>In-Trench</i> 4 mm
12	1	5	<i>In-Trench</i> 4 mm

## 5. Pengujian Data Tanah

Sebelum memulai eksperimen *scouring*, pengujian tanah perlu dilakukan. Seperti yang dijelaskan sebelumnya, pengujian tanah/pasir ini bertujuan untuk memperoleh data *specific gravity* dan  $d_{50}$  yang digunakan untuk analisa hasil *scouring* yang terjadi di sekitar pipa. Pengujian tanah ini dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah dan Batuan Jurusan Teknik Sipil – ITS. Tanah/pasir yang digunakan untuk eksperimen ini adalah jenis pasir pantai.

Terdapat banyak peralatan yang harus disiapkan sebelum pengujian tersebut. Berikut adalah peralatan yang digunakan untuk pengujian *specific gravity* dan  $d_{50}$ .

- 2 Piknometer 250 ml ( No. 23 dan No. 62)
- 2 Cawan (No. 144 dan No. 48)
- Oven
- Termometer
- Timbangan digital
- Saringan (No. 4, No. 20, No. 40, No. 100)
- Pan
- Kain Lap
- *Vacum Pump*

## 6. Persiapan Eksperimen *Scouring*

Peralatan yang digunakan untuk eksperimen adalah sebagai berikut.

### a. *Flume Tank*

*Flume tank* yang digunakan adalah *Flume Tank* pada Laboratorium Energi dan Lingkungan Laut Jurusan Teknik Kelautan. Ukuran dari *flume tank* tersebut adalah 20 m x 2,3 m x 2,5 m (panjang, lebar, tinggi). *Flume Tank* ini memiliki tiga jenis pembangkit yaitu pembangkit angin, pembangkit arus, dan pembangkit gelombang. Pembangkit angin dengan menggunakan sistem blower dengan kecepatan maksimum angin sebesar 10 m/s. Pembangkit arus dengan sistem *impeller* dengan rentang kecepatan

2,5 hingga 10 cm/s. Pembangkit gelombang menggunakan sistem *plunyer* dengan karakteristik gelombang ireguler dan reguler dengan tinggi gelombang maksimum yang dapat dibangkitkan adalah 30 cm (gelombang reguler) dan 7 cm (gelombang ireguler). Untuk besar periode berkisar 0,5 – 3,0 detik, dan kedalaman air maksimum sebesar 80 cm. Oleh karena itu, tinggi gelombang maksimum dalam penelitian ini adalah 7 cm



Gambar 3.5 *Flume Tank* Jurusan Teknik Kelautan ITS

b. *Wave Probe*

*Wave probe* merupakan alat pengukur tinggi gelombang. Alat ini akan dipasang tercelup air yang dilengkapi dengan elektroda untuk mengukur konduktivitas air. Konduktivitas tersebut berubah secara proporsional sesuai dengan variasi perubahan elevasi muka air. Jumlah *wave probe* yang digunakan untuk eksperimen ini adalah sebanyak dua buah yang diletakkan pada bagian depan pipa dan bagian belakang pipa.



Gambar 3.6 *Wave Probe*

c. Kamera Video

Kamera video digunakan untuk merekam laju propagasi *scouring* pada pipa mulai awal sampai akhir (mencapai kedalaman *scouring* maksimum). Dengan kamera ini, dapat diketahui berapa lama waktu yang dibutuhkan hingga tercapai kedalaman *scouring* maksimum. Kamera video akan diletakkan sejajar dengan posisi pipa dan selalu pada posisi yang sama untuk memudahkan pengamatan.

7. Eksperimen dan Pengamatan *Scouring* pada Pipa

Sebelum pengujian dimulai, terlebih dahulu dilakukan percobaan *running* untuk mengetahui estimasi waktu pengujian dan waktu pencatatan. Tiap pengujian akan dilakukan selama 40 menit hingga tidak terjadi penambahan kedalaman *scouring* (kondisi maksimum). Pencatatan data untuk nilai kedalaman dan lebar *scouring* akan dilakukan setiap interval 5 menit dengan menggunakan penggaris. Dan di setiap 5 menit, mesin berhenti selama 1 menit kemudian dinyalakan kembali.

8. Analisa dan Pembahasan Hasil

Setelah eksperimen dilakukan, hasil yang diperoleh perlu dianalisa dan dibahas lebih lanjut lagi untuk memperoleh kesimpulan yang sebenarnya berdasarkan eksperimen tersebut. Dari pencatatan nilai kedalaman dan lebar *scouring* tiap 5 menit tersebut akan diolah dengan menggunakan AutoCAD untuk menentukan profil *scouring* (2D) yang terjadi di sekitar pipa.

9. Kesimpulan dan Saran

Langkah terakhir adalah penulisan kesimpulan dan saran berdasarkan eksperimen dan analisa yang telah dilakukan sebelumnya.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB IV

### ANALISA DAN PEMBAHASAN

Dalam penelitian ini, ada tiga variabel bebas yang digunakan sebagai perbandingan untuk pengukuran kedalaman dan lebar *scouring* pada pipa, yaitu tinggi gelombang ( $H_i$ ), periode gelombang ( $T_i$ ) dan peletakan pipa ( $e/D$ ). Tiga variabel diatas terbagi dalam 12 variasi, yaitu tiga variasi tinggi gelombang dan 4 variasi peletakan. Sebelum pengujian *scouring* dimulai, pasir yang digunakan diuji terlebih dahulu. Setelah pasir/tanah sudah diuji, eksperimen *scouring* dapat dilakukan. *Output* dari eksperimen ini adalah memperoleh data kedalaman, lebar *scouring* dan laju propagasi yang terjadi pada sekitar pipa. Untuk keperluan analisa, juga diperoleh data pencatatan gelombang yang merupakan hasil konversi dari pencatatan perubahan elevasi muka air oleh *wave probe*.

#### 4.1 Data Tanah

Setelah melakukan pengujian *specific gravity* (SG) dan *sieve analysis* (ayakan tanah), berikut adalah hasil pengujian tanah yang akan digunakan dalam eksperimen *scouring* ini.

Tabel 4.1 Hasil pengujian *specific gravity*

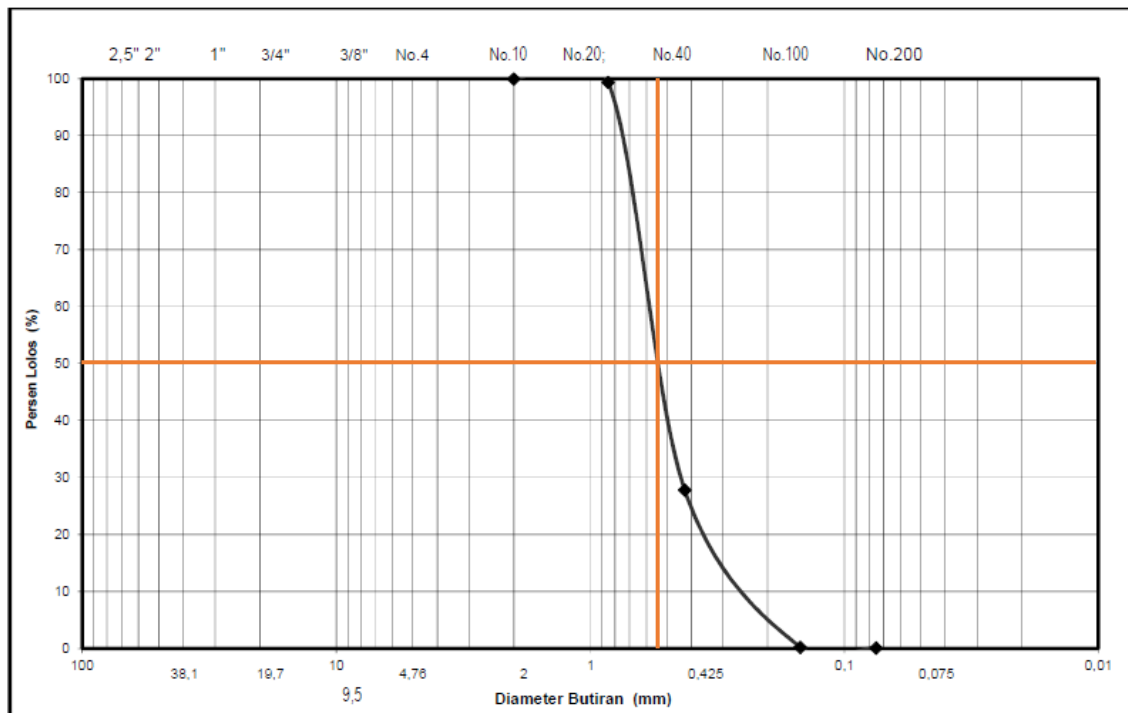
Nomor Piknometer	23	62
Berat piknometer kosong ( $W_1$ )	87,633 gr	125,813 gr
Berat piknometer + tanah kering ( $W_2$ )	179,189 gr	176,74 gr
Berat piknometer + air suling + tanah kering ( $W_3$ )	395,538 gr	407,401 gr
Berat piknometer + air suling ( $W_4$ )	336,12 gr	374,33 gr
Temperatur (Pikno + Air)	27,7 °C	27,7 °C
Temperatur (Pikno + Air + Tanah)	26,5 °C	26,5 °C
<i>Specific Gravity</i> (GS)	2,85	2,85

Dari data tabel tersebut, nilai dari GS untuk *sample* tanah diatas dapat diperoleh dari rata-rata hasil analisa GS antara piknometer 23 dengan piknometer 62 yaitu sebesar 2,85.

Tabel 4.2 Hasil analisa pengujian pembagian butir tanah

Berat tanah kering		=		500	gr
Berat mangkok		=		13,93	gr
Sieve		Berat Tertahan		%	%
#	Ø (mm)	(gr)		Tertahan	Lolos
2.5"	63				
1 1/2"	37,5				
1"	25,4				
3/4"	19,1				
3/8"	9,5				
4	4,76				
10	2,00	14,34	0,41	0,08	99,92
20	0,85	16,91	2,98	0,60	99,32
40	0,425	371,44	357,51	71,50	27,82
100	0,149	152,02	138,09	27,62	0,20
200	0,075	14,54	0,61	0,12	0,08
Pan					
			499,60	99,92	

Setelah semua tercatat dalam tabel tersebut, untuk mencari nilai dari  $d_{50}$ , didapatkan melai grafik yang merupakan hasil pengolahan dari tabel 4.2 tersebut. Berikut adalah grafik analisa pembagian butir tanah.



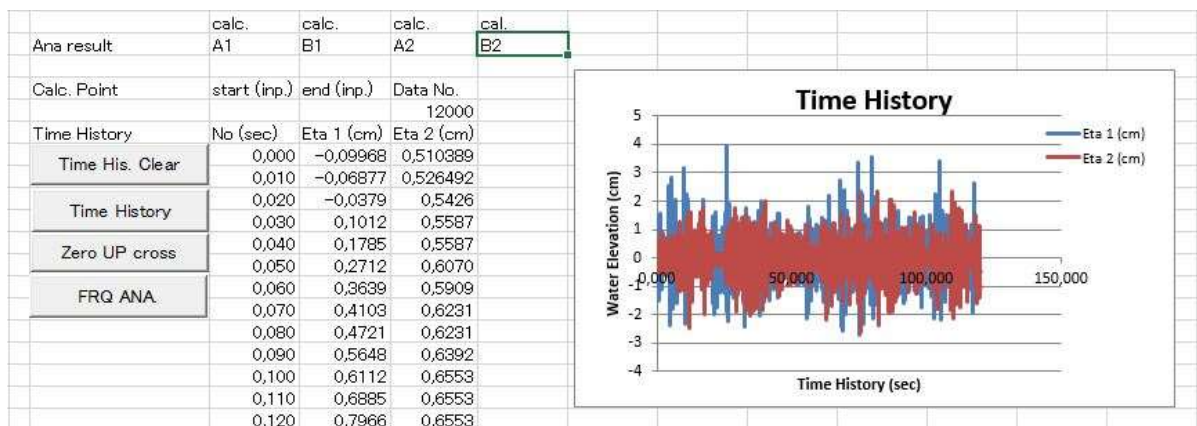
Gambar 4.1 Grafik analisa hasil pengujian pembagian butir tanah



Seperti yang diketahui,  $d_{50}$  merupakan ukuran butiran tanah yang lolos ayakan 50%. Dari grafik diatas, dapat diketahui nilai dari  $d_{50}$  dengan cara menarik garis horisontal pada angka 50 sebelah kiri hingga berpotongan dengan gradik tersebut. Kemudian tarik garis vertikal ke bawah hingga mendapatkan nilai dari diameter butiran (mm) yang merupakan nilai dari  $d_{50}$ . Dari hasil pengujian tersebut, nilai dari  $d_{50}$  adalah **0,55 mm** yang termasuk dalam kategori *medium sand*. Terdapat penelitian terkait *scouring* yang menggunakan pasir dengan ukuran  $d_{50}$  lebih besar dari 0,55 mm. Salah satunya adalah penelitian yang dilakukan oleh Güney dkk. (2011) yang berjudul *Experimental Study of Local Scour Submerged Pipe Resulting from Hydrograph*. Dalam penelitian tersebut,  $d_{50}$  dari tanah yang digunakan tersebut adalah 3,4 mm. Namun untuk ukuran pipa yang digunakan berdiameter 6 cm dan panjang 80 cm dengan ketebalan lapisan tanah 65 mm. Dalam penelitian tersebut kedalaman *scouring* maksimum yang terjadi mencapai 5 cm dan lebar 11 cm.

#### 4.2 Data Gelombang

Data gelombang untuk pengujian *scouring* pada pipa ini didapat dari data pencatatan yang dihasilkan oleh *wave probe*. *Wave probe* yang digunakan sebanyak dua buah yang terletak di bagian depan dan bagian belakang pipa. Keduanya sama-sama berjarak 50 cm dari posisi pipa. Data pembacaan *wave probe* berupa format *time history* (.TMH) yang bisa dibaca dengan bantuan Excel Refana. Pada eksperimen ini, data gelombang yang tercatat sebanyak 25 tiap detiknya, dan satuan untuk pengukuran tinggi gelombang yang tercatat adalah volt. Dari hasil pembacaan Refana tersebut, kemudian diolah menggunakan *software* WareLab (AnaWare) untuk menghasilkan spektrum JONSWAP dari gelombang ireguler tersebut. Berikut adalah hasil pembacaan file dengan format *time history* (.TMH) dengan menggunakan Excel Refana.

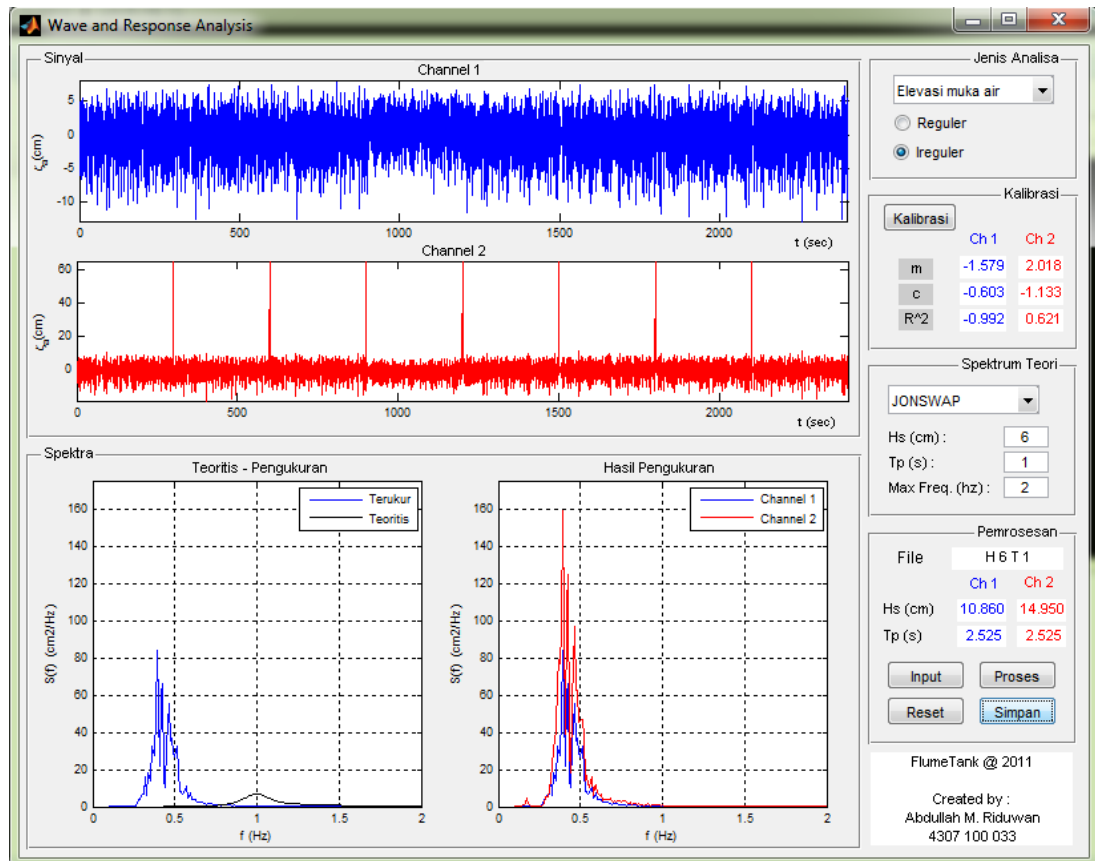


Gambar 4.2 Pembacaan data format *time history* (.TMH) dari *wave probe* dengan menggunakan Excel Refana

Nilai dari Eta 1 merupakan hasil pembacaan nilai tegangan yang terekam pada *wave probe* 1. *Wave probe* 1 terletak di bagian depan pipa. Sedangkan nilai dari Eta 2 merupakan hasil pembacaan nilai tegangan yang terekam pada *wave probe* 2. *Wave probe* 2 terletak di bagian belakang pipa.

Sebelum pengujian dimulai, *wave probe* dikalibrasi terlebih dahulu. Proses kalibrasi ini dilakukan satu hari sekali sebelum pengujian dimulai. Pada pengujian ini, terdapat 5 elevasi berbeda untuk kalibrasi *wave probe*. Posisi 0 merupakan posisi *wave probe* yang digunakan untuk pengujian ini, kemudian posisi +5 cm (naik 5 cm dari posisi 0), +10 cm (naik 10 cm dari posisi 0), -5 cm (turun 5 cm dari posisi 0), -10 cm (turun 10 cm dari posisi 0). Nilai kalibrasi *wave probe* tersebut diolah menggunakan Excel Refana kemudian hasilnya disalin di file Excel yang baru dengan nama yang berbeda. Pada posisi 0 (0.xls), +5 cm (D2.xls), +10 cm (D3.xls), -5 cm (U2.xls), -10 cm (U3.xls).

Setelah kalibrasi selesai, pengujian bisa dilakukan. Selama pengujian, hasil pencatatan tinggi gelombang juga menggunakan *wave probe*, kemudian diolah kembali menggunakan Excel Refana. Setelah itu dikelompokkan menjadi satu folder dengan file excel kalibrasi dan *software* AnaWare. Setelah dikelompokkan menjadi satu folder, data tersebut diolah dengan menggunakan *software* AnaWare.



Gambar 4.3 Tampilan pengolahan data gelombang menggunakan AnaWare

Perlu diketahui bahwa untuk *running* AnaWare ini, harus terlebih dahulu *install software* Matlab. Hal ini dikarenakan AnaWare dan Matlab saling terkoneksi satu sama lain. Sebelum mulai *running* AnaWare, klik tombol kalibrasi. Kemudian atur terlebih dahulu jenis gelombang, spektrum dan input gelombang. Semua data yang tercatat dalam setiap variasi akan diolah dengan cara yang sama seperti diatas.

Hasil pengolahan data dengan menggunakan *software* AnaWare diantaranya adalah tinggi gelombang signifikan ( $H_s$ ), periode puncak gelombang ( $T_p$ ), tinggi gelombang rata-rata ( $H_{avg}$ ) dan periode rata-rata ( $T_{avg}$ ). Selain itu, hasil dari *running* AnaWare berupa spektrum JONSWAP yang dapat disimpan. Berikut adalah tabel hasil olahan *software* AnaWare pada pengujian yang sudah dilakukan.

Tabel 4.3 Hasil pengolahan data gelombang dengan AnaWare

Percobaan ke-	Ch1 (Depan)				Ch2 (Belakang)				Jenis Peletakan
	H <sub>s</sub> (cm)	T <sub>p</sub> (s)	H <sub>avg</sub> (cm)	T <sub>avg</sub> (s)	H <sub>s</sub> (cm)	T <sub>p</sub> (s)	H <sub>avg</sub> (cm)	T <sub>avg</sub> (s)	
1	8,80	1,54	5,55	2,02	11,07	1,28	6,92	1,95	Meletak
2	10,19	1,56	6,37	2,15	12,51	1,31	7,82	2,08	Meletak
3	11,07	1,54	6,92	2,06	13,78	1,32	8,61	2,00	Meletak
4	9,01	1,56	5,63	2,03	11,42	1,29	7,14	1,97	Trench 2 mm
5	10,52	1,62	6,57	2,18	13,06	1,30	8,16	2,10	Trench 2 mm
6	11,12	1,56	6,95	2,07	13,89	1,32	8,68	2,02	Trench 2 mm
7	9,59	1,56	5,99	2,04	12,02	1,29	7,51	1,98	Trench 3 mm
8	10,36	1,59	6,48	2,16	12,96	1,31	8,10	2,10	Trench 3 mm
9	11,29	1,53	7,05	2,06	13,84	1,32	8,65	2,01	Trench 3 mm
10	8,36	1,51	5,22	2,01	10,55	1,26	6,60	1,94	Trench 4 mm
11	9,72	1,55	6,08	2,17	12,21	1,28	7,60	2,11	Trench 4 mm
12	10,66	1,53	6,66	2,07	13,28	1,29	8,30	2,00	Trench 4 mm

Dari tabel diatas, dapat diketahui bahwa hasil *input* dengan *output* data gelombang ireguler tidak sama. Begitu juga data yang dihasilkan pada Ch1 dan Ch2, ada yang lebih besar dari *input* dan ada juga yang lebih kecil. Hal ini dikarenakan sifat gelombang ireguler yang polanya selalu berubah tiap waktu. Dari tabel diatas, data gelombang yang digunakan untuk analisis adalah data yang tercatat pada Ch1 atau *wave probe* yang terletak pada bagian depan. Hal ini dikarenakan data yang tercatat pada Ch1 merupakan data gelombang datang sebelum adanya pengaruh pipa.

#### 4.3 Hasil Pengukuran Kedalaman dan Lebar *Scouring*

Seperti yang dijelaskan sebelumnya, terdapat total 12 variasi dalam eksperimen ini. Ada empat variasi peletakan (e/D) pipa, dimana setiap variasi peletakan terdapat tiga variasi tinggi gelombang. Semua variasi eksperimen dilakukan selama 40 menit (5 menit x 8), dimana tiap lima menit mesin akan berhenti selama 2-3 menit. Selama eksperimen berjalan, pencatatan kedalaman, lebar dan laju propagasi *scouring* dilakukan dengan bantuan kamera . Hasilnya

berupa foto dan video yang kemudian akan diolah lebih lanjut dengan menggunakan AutoCAD dan Microsoft Excel.

Setiap lima menit, perubahan elevasi lapisan tanah juga difoto menggunakan kamera. Dalam bab ini, hanya akan ditampilkan tiga foto eksperimen *scouring* yaitu pada kondisi awal ( $t = 0$  menit), perubahan elevasi pada saat  $t = 20$  menit, dan kondisi akhir ( $t = 40$  menit). Untuk hasil yang lengkap dapat dilihat pada **Lampiran B**. Dari foto tersebut, kemudian diplot menggunakan *software* AutoCAD untuk mengetahui profil 2D berdasarkan pengamatan dari samping (sisi dinding kaca *flume tank*). Setelah semua foto tersebut di plot, kemudian dilakukan *overlay* hingga terbentuk sketsa laju propagasi *scouring* pada pipa mulai dari  $t = 0$  menit hingga  $t = 40$  menit. Untuk mempermudah laju propagasi *scouring*, data-data plot dari AutoCAD akan dimasukkan kedalam Microsoft Excel hingga terbentuk grafik yang menggambarkan laju propagasi *scouring*.

#### 4.3.1 Hasil Eksperimen *Scouring* untuk Pipa Kondisi Meletak

Pengujian pertama yang dilakukan untuk pipa dengan kondisi meletak ini adalah dengan  $H_i = 5$  cm dan  $T_i = 1$  detik yang menghasilkan  $H_{avg} = 5,55$  cm dan  $T_{avg} = 2,02$  s. Berikut adalah kondisi awal ( $t = 0$  menit) pipa sebelum pengujian dilakukan.



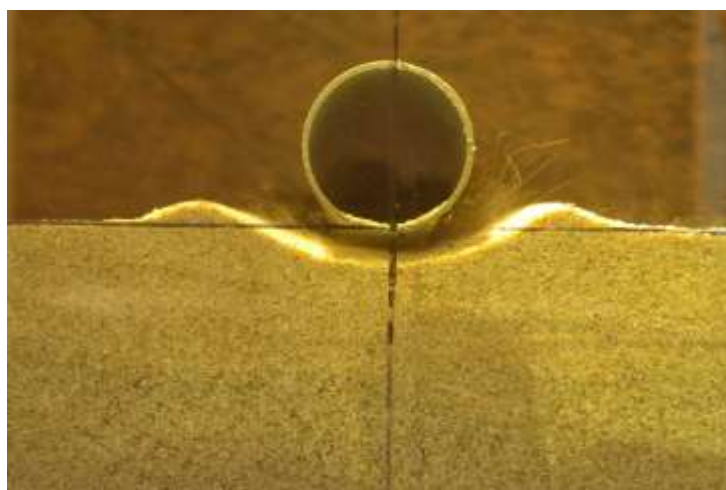
Gambar 4.4 Kondisi awal ( $t = 0$  menit) eksperimen *scouring* pada pipa kondisi meletak dengan  $H_{avg} = 5,55$  cm dan  $T_{avg} = 2,02$  s

Setelah eksperimen berjalan selama 20 menit, kedalaman *scouring* maksimum yang terbentuk adalah 0,76 cm dengan lebar *scouring* mencapai 4,93 cm. Berikut adalah profil *scouring* pada  $t = 20$  menit.



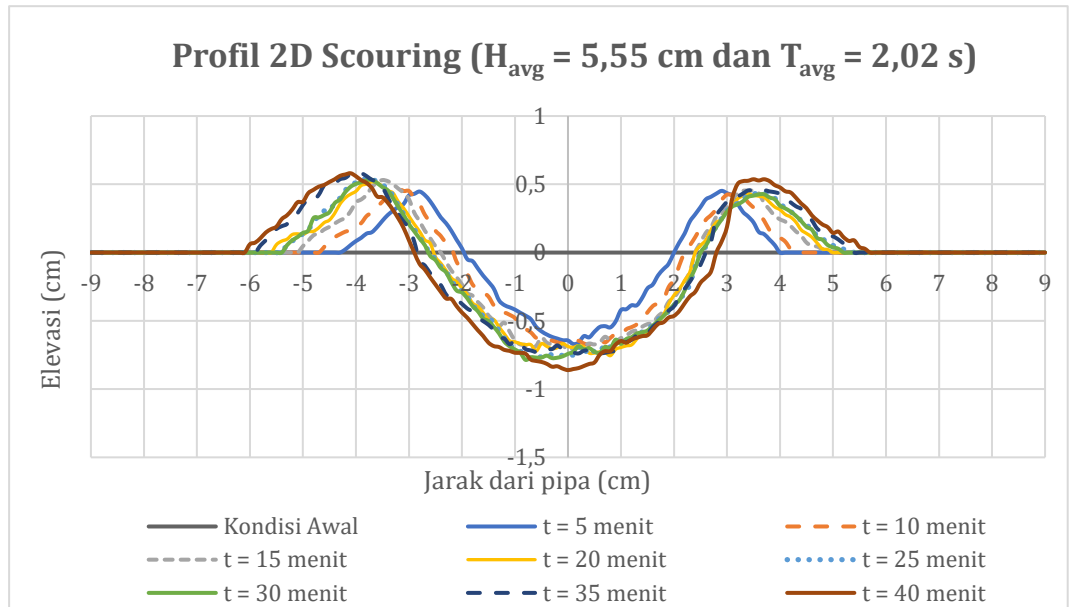
Gambar 4.5 Kondisi eksperimen *scouring* pada  $t = 20$  menit pada pipa kondisi meletak dengan  $H_{avg} = 5,55$  cm dan  $T_{avg} = 2,02$  s

Setelah eksperimen selesai dilakukan selama 40 menit, kondisi akhir kedalaman *scouring* maksimum yang terbentuk bertambah menjadi 0,86 cm dengan lebar *scouring* juga mencapai 4,93 cm. Berikut adalah kondisi akhirprofil *scouring* atau pada saat  $t = 40$  menit.



Gambar 4.6 Kondisi akhir ( $t = 40$  menit) eksperimen *scouring* pada pipa kondisi meletak dengan  $H_{avg} = 5,55$  cm dan  $T_{avg} = 2,02$  s

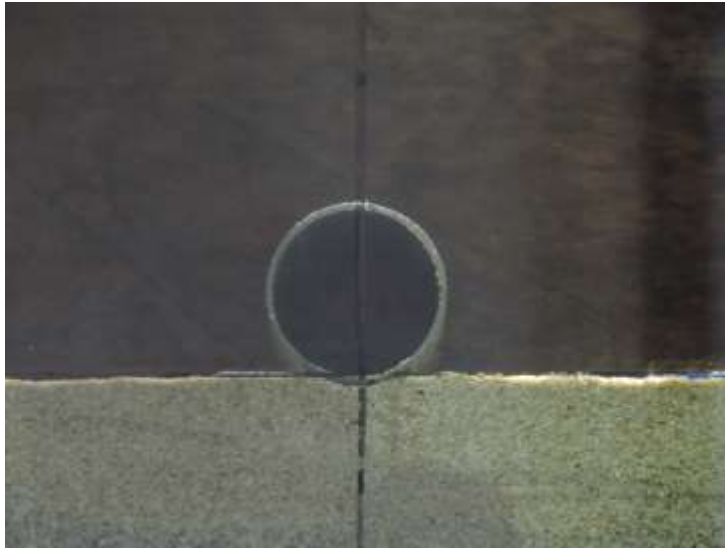
Setelah semua data pada AutoCAD sudah dimasukkan ke Microsoft Excel, berikut adalah perubahan profil 2D *scouring* mulai dari  $t = 0$  menit hingga  $t = 40$  menit.



Gambar 4.7 Perubahan profil 2D *scouring* pipa kondisi meletak dengan  $H_{avg} = 5,55$  cm dan  $T_{avg} = 2,02$  s

Pada grafik perubahan profil 2D *scouring* tersebut, posisi pipa berada pada koordinat 0,0. Koordinat jarak negatif merupakan daerah belakang pipa dan koordinat positif merupakan daerah depan pipa. Dalam eksperimen ini, *scouring* mulai terbentuk sejak gelombang mulai bergerak dan langsung menggerus bagian bawah pipa. *Scouring* terus berkembang menjadi lebih dalam dan lebih lebar hingga eksperimen berakhir ( $t = 40$  menit).

Pengujian kedua yang dilakukan untuk pipa dengan kondisi meletak ini adalah dengan  $H_i = 6$  cm dan  $T_i = 1$  detik yang menghasilkan  $H_{avg} = 6,37$  cm dan  $T_{avg} = 2,15$  s. Berikut adalah kondisi awal ( $t = 0$  menit) pipa sebelum pengujian dilakukan.



Gambar 4.8 Kondisi awal ( $t = 0$  menit) eksperimen *scouring* pada pipa kondisi meletak dengan  $H_{avg} = 6,37$  cm dan  $T_{avg} = 2,15$  s

Setelah eksperimen berjalan selama 20 menit, kedalaman *scouring* maksimum yang terbentuk adalah 1,01 cm dengan lebar *scouring* mencapai 6,33 cm. Berikut adalah profil *scouring* pada  $t = 20$  menit.

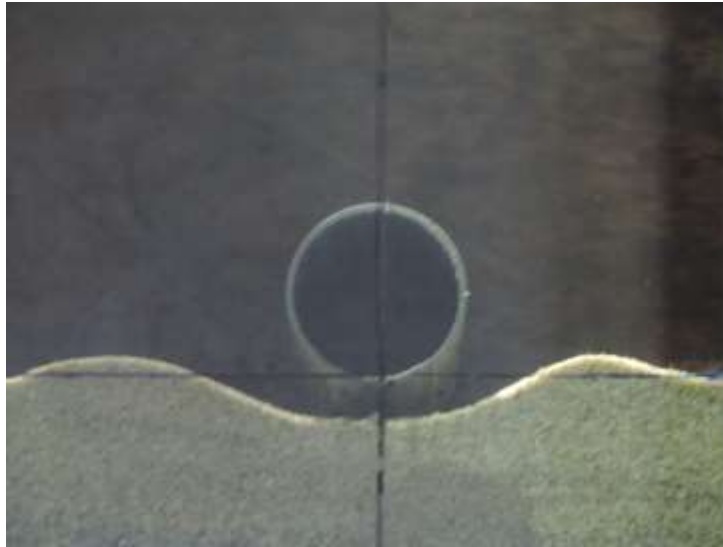


Gambar 4.9 Kondisi eksperimen *scouring* pada  $t = 20$  menit pada pipa kondisi meletak dengan  $H_{avg} = 6,37$  cm dan  $T_{avg} = 2,15$  s

Setelah eksperimen selesai dilakukan selama 40 menit, kondisi akhir kedalaman *scouring* maksimum yang terbentuk adalah 1,04 cm dengan

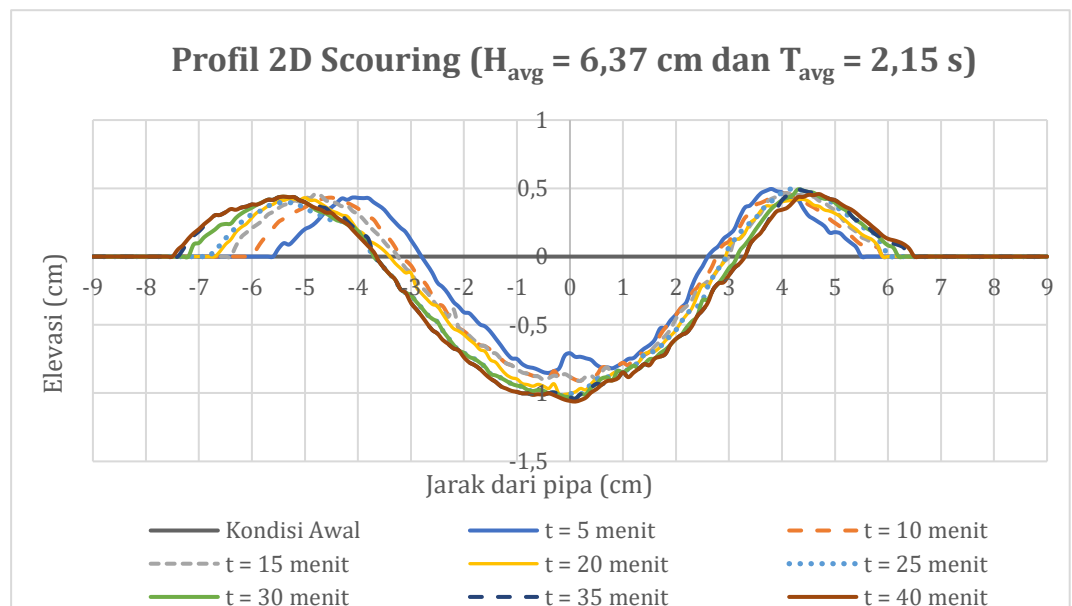


lebar *scouring* mencapai 6,90 cm. Berikut adalah kondisi akhirprofil *scouring* atau pada saat  $t = 40$  menit.



Gambar 4.10 Kondisi akhir ( $t = 40$  menit) eksperimen *scouring* pada pipa kondisi meletak dengan  $H_{avg} = 6,37$  cm dan  $T_{avg} = 2,15$  s

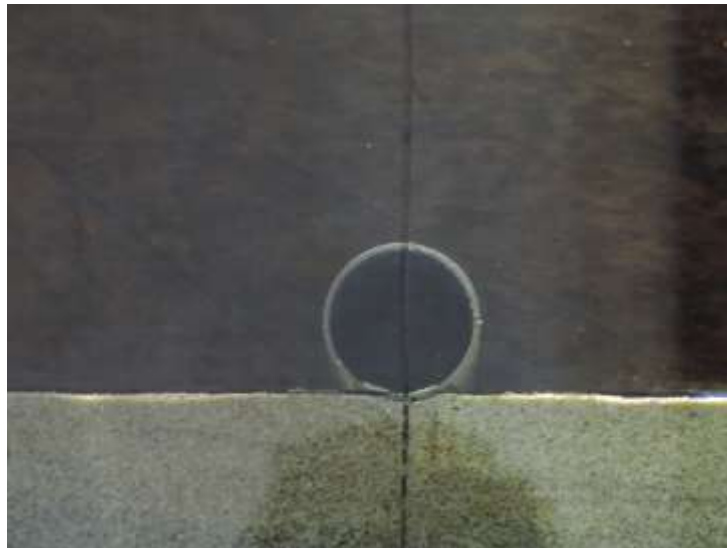
Setelah semua data pada AutoCAD sudah dimasukkan ke Microsoft Excel, berikut adalah perubahan profil 2D *scouring* mulai dari  $t = 0$  menit hingga  $t = 40$  menit.



Gambar 4.11 Perubahan profil 2D *scouring* pipa kondisi meletak dengan  $H_{avg} = 6,37$  cm dan  $T_{avg} = 2,15$  s

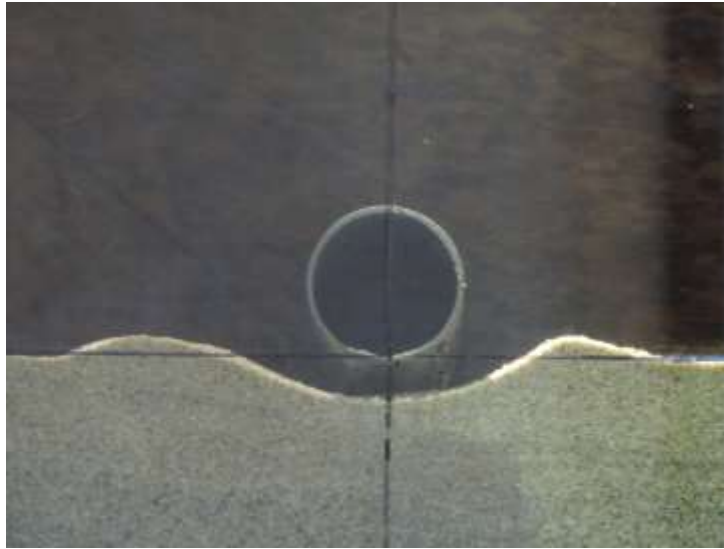
Pada grafik perubahan profil 2D *scouring* tersebut, posisi pipa berada pada koordinat 0,0. Koordinat jarak negatif merupakan daerah belakang pipa dan koordinat positif merupakan daerah depan pipa. Dalam eksperimen ini, *scouring* mulai terbentuk sejak gelombang mulai bergerak dan langsung menggerus bagian bawah pipa. *Scouring* terus berkembang menjadi lebih dalam dan lebih lebar hingga eksperimen berakhir ( $t = 40$  menit).

Pengujian ketiga yang dilakukan untuk pipa dengan kondisi meletak ini adalah dengan  $H_i = 7$  cm dan  $T_i = 1$  detik yang menghasilkan  $H_{avg} = 6,92$  cm dan  $T_{avg} = 2,06$  s. Berikut adalah kondisi awal ( $t = 0$  menit) pipa sebelum pengujian dilakukan.



Gambar 4.12 Kondisi awal ( $t = 0$  menit) eksperimen *scouring* pada pipa kondisi meletak dengan  $H_{avg} = 6,92$  cm dan  $T_{avg} = 2,06$  s

Setelah eksperimen berjalan selama 20 menit, kedalaman *scouring* maksimum yang terbentuk adalah 1,04 cm dengan lebar *scouring* mencapai 6,74 cm. Berikut adalah profil *scouring* pada  $t = 20$  menit.



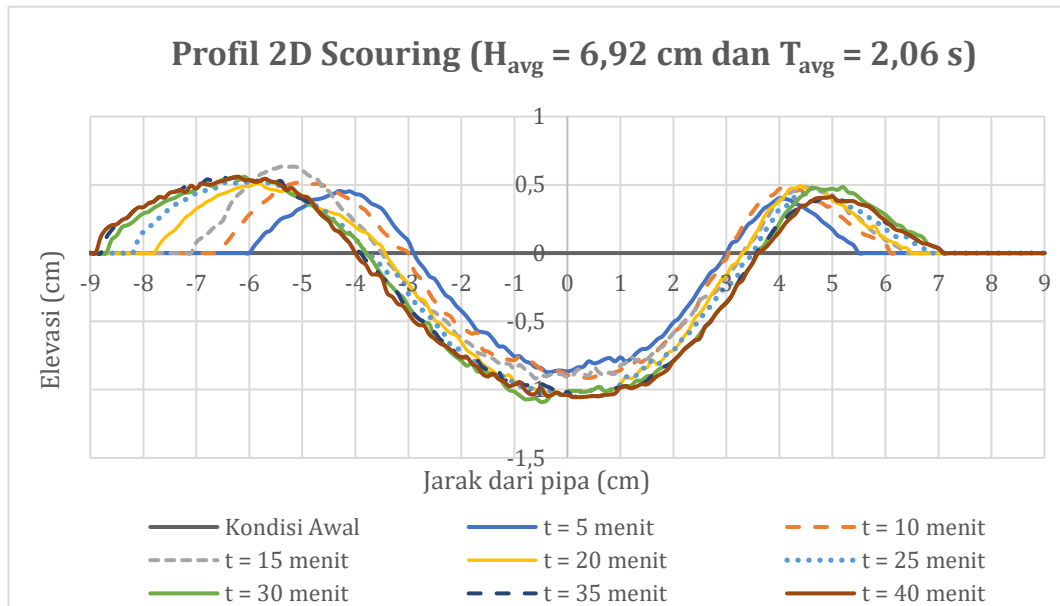
Gambar 4.13 Kondisi eksperimen *scouring* pada  $t = 20$  menit pada pipa kondisi meletak dengan  $H_{avg} = 6,92$  cm dan  $T_{avg} = 2,06$  s

Setelah eksperimen selesai dilakukan selama 40 menit, kondisi akhir kedalaman *scouring* maksimum yang terbentuk bertambah menjadi 1,05 cm dengan lebar *scouring* juga mencapai 7,60 cm. Berikut adalah kondisi akhir profil *scouring* atau pada saat  $t = 40$  menit.



Gambar 4.14 Kondisi akhir ( $t = 40$  menit) eksperimen *scouring* pada pipa kondisi meletak dengan  $H_{avg} = 6,92$  cm dan  $T_{avg} = 2,06$  s

Setelah semua data pada AutoCAD sudah dimasukkan ke Microsoft Excel, berikut adalah perubahan profil 2D *scouring* mulai dari  $t = 0$  menit hingga  $t = 40$  menit.

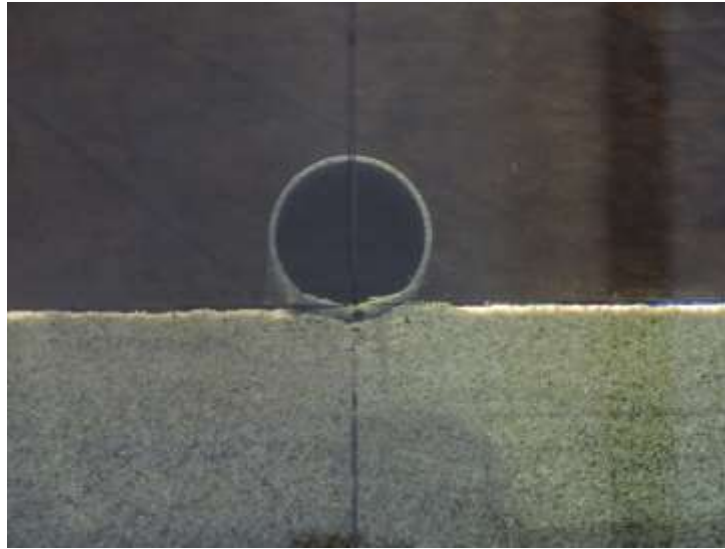


Gambar 4.15 Perubahan profil 2D *scouring* pipa kondisi meletak dengan  $H_{avg} = 6,92$  cm dan  $T_{avg} = 2,06$  s

Pada grafik perubahan profil 2D *scouring* tersebut, posisi pipa berada pada koordinat 0,0. Koordinat jarak negatif merupakan daerah belakang pipa dan koordinat positif merupakan daerah depan pipa. Dalam eksperimen ini, *scouring* mulai terbentuk sejak gelombang mulai bergerak dan langsung menggerus bagian bawah pipa. *Scouring* terus berkembang menjadi lebih dalam dan lebih lebar hingga eksperimen berakhir ( $t = 40$  menit).

#### 4.3.2 Hasil Eksperimen *Scouring* untuk Pipa Kondisi *In-Trench* 2 mm

Pengujian pertama yang dilakukan untuk pipa dengan kondisi *in-trench* 2 mm ini adalah dengan  $H_i = 5$  cm dan  $T_i = 1$  detik yang menghasilkan  $H_{avg} = 5,63$  cm dan  $T_{avg} = 2,03$  s. Berikut adalah kondisi awal ( $t = 0$  menit) pipa sebelum pengujian dilakukan.



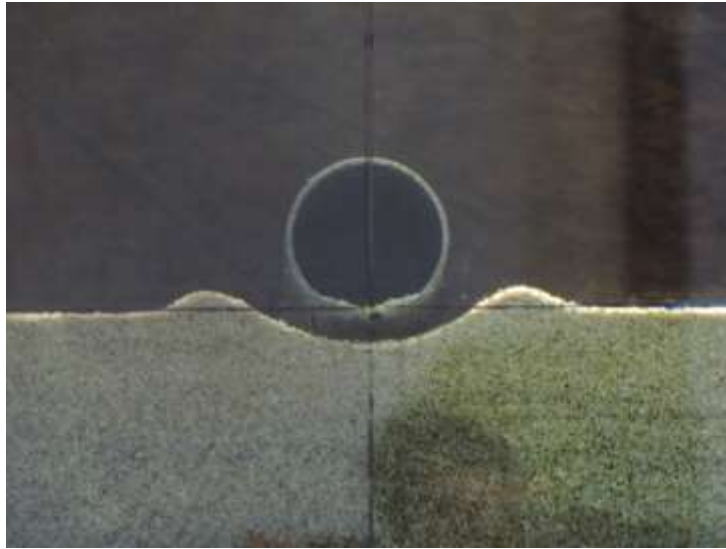
Gambar 4.16 Kondisi awal ( $t = 0$  menit) eksperimen *scouring* pada pipa kondisi *in-trench* 2 mm dengan  $H_{avg} = 5,63$  cm dan  $T_{avg} = 2,03$  s

Setelah eksperimen berjalan selama 20 menit, kedalaman *scouring* maksimum yang terbentuk adalah 0,67 cm dengan lebar *scouring* mencapai 4,74 cm. Berikut adalah profil *scouring* pada  $t = 20$  menit.



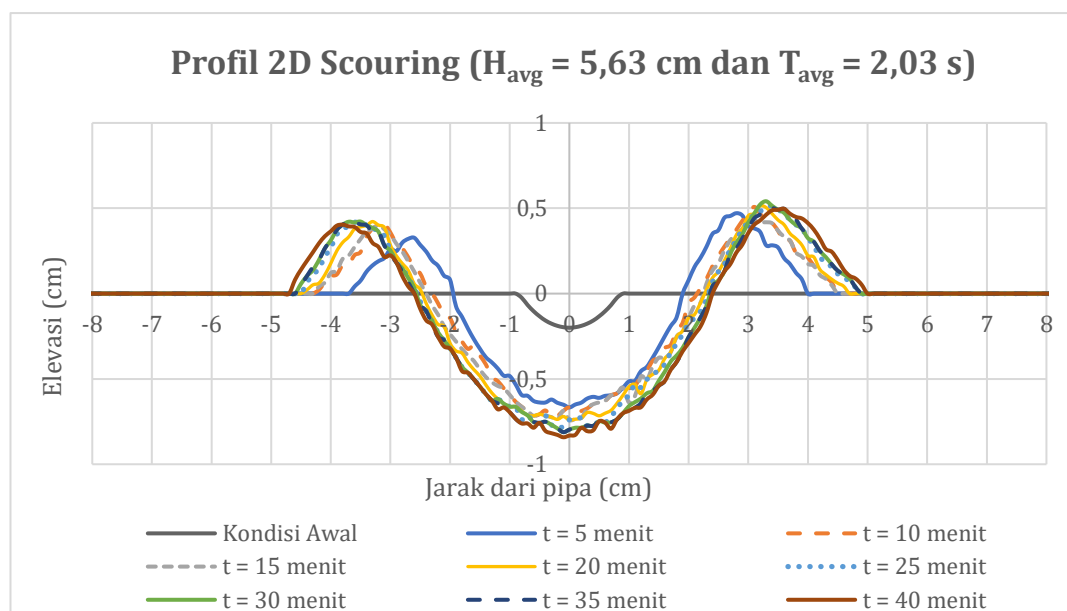
Gambar 4.17 Kondisi eksperimen *scouring* pada  $t = 20$  menit pada pipa kondisi *in-trench* 2 mm dengan  $H_{avg} = 5,63$  cm dan  $T_{avg} = 2,03$  s

Setelah eksperimen selesai dilakukan selama 40 menit, kondisi akhir kedalaman *scouring* maksimum yang terbentuk bertambah menjadi 0,74 cm dengan lebar *scouring* juga mencapai 5,00 cm. Berikut adalah kondisi akhir profil *scouring* atau pada saat  $t = 40$  menit.



Gambar 4.18 Kondisi akhir ( $t = 40$  menit) eksperimen *scouring* pada pipa kondisi *in-trench* 2 mm dengan  $H_{avg} = 5,63$  cm dan  $T_{avg} = 2,03$  s

Setelah semua data pada AutoCAD sudah dimasukkan ke Microsoft Excel, berikut adalah perubahan profil 2D *scouring* mulai dari  $t = 0$  menit hingga  $t = 40$  menit.



Gambar 4.19 Perubahan profil 2D *scouring* pipa kondisi *in-trench* 2 mm dengan  $H_{avg} = 5,63$  cm dan  $T_{avg} = 2,03$  s

Pada grafik perubahan profil 2D *scouring* tersebut, posisi pipa berada pada koordinat 0,0. Koordinat jarak negatif merupakan daerah belakang pipa dan koordinat positif merupakan daerah depan pipa. Kondisi awal

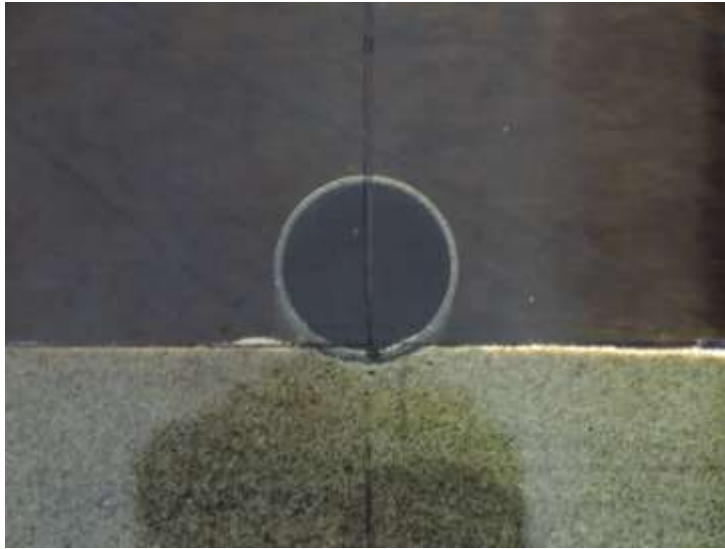
merupakan kondisi pada saat  $t = 0$  menit, dimana eksperimen belum dijalankan sehingga *scouring* belum terjadi sama sekali. Meskipun terbentuk cekungan dalam profil 2D tersebut, namun itu bukan menunjukkan terjadinya *scouring*, melainkan posisi awal pipa dengan kondisi *in-trench* 2 mm. Dalam eksperimen ini, *scouring* mulai terbentuk sejak 5 menit pertama. Kemudian *scouring* terus berkembang menjadi lebih dalam dan lebih lebar hingga eksperimen berakhir ( $t = 40$  menit).

Pengujian kedua yang dilakukan untuk pipa dengan kondisi *in-trench* 2 mm ini adalah dengan  $H_i = 6$  cm dan  $T_i = 1$  detik yang menghasilkan  $H_{avg} = 6,57$  cm dan  $T_{avg} = 2,18$  s. Berikut adalah kondisi awal ( $t = 0$  menit) pipa sebelum pengujian dilakukan.



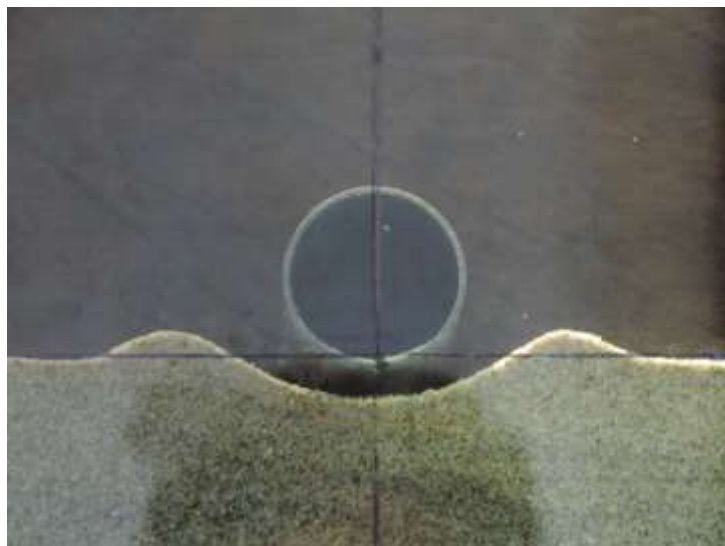
Gambar 4.20 Kondisi awal ( $t = 0$  menit) eksperimen *scouring* pada pipa kondisi *in-trench* 2 mm dengan  $H_{avg} = 6,57$  cm dan  $T_{avg} = 2,18$  s

Setelah eksperimen berjalan selama 20 menit, kedalaman *scouring* maksimum yang terbentuk adalah 0,21 cm dengan lebar *scouring* mencapai 2,60 cm. Berikut adalah profil *scouring* pada  $t = 20$  menit.



Gambar 4.21 Kondisi eksperimen *scouring* pada  $t = 20$  menit pada pipa kondisi *in-trench* 2 mm dengan  $H_{avg} = 6,57$  cm dan  $T_{avg} = 2,18$  s

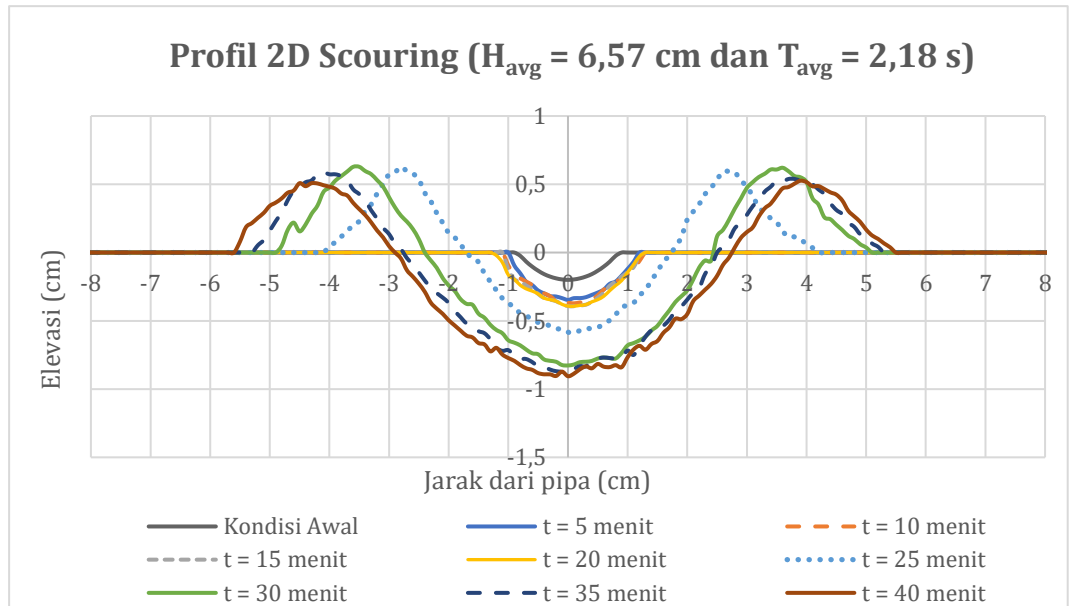
Setelah eksperimen selesai dilakukan selama 40 menit, kondisi akhir kedalaman *scouring* maksimum yang terbentuk bertambah menjadi 0,84 cm dengan lebar *scouring* juga mencapai 5,65 cm. Berikut adalah kondisi akhir profil *scouring* atau pada saat  $t = 40$  menit.



Gambar 4.22 Kondisi akhir ( $t = 40$  menit) eksperimen *scouring* pada pipa kondisi *in-trench* 2 mm dengan  $H_{avg} = 6,57$  cm dan  $T_{avg} = 2,18$  s

Setelah semua data pada AutoCAD sudah dimasukkan ke Microsoft Excel, berikut adalah perubahan profil 2D *scouring* mulai dari  $t = 0$  menit hingga  $t = 40$  menit.

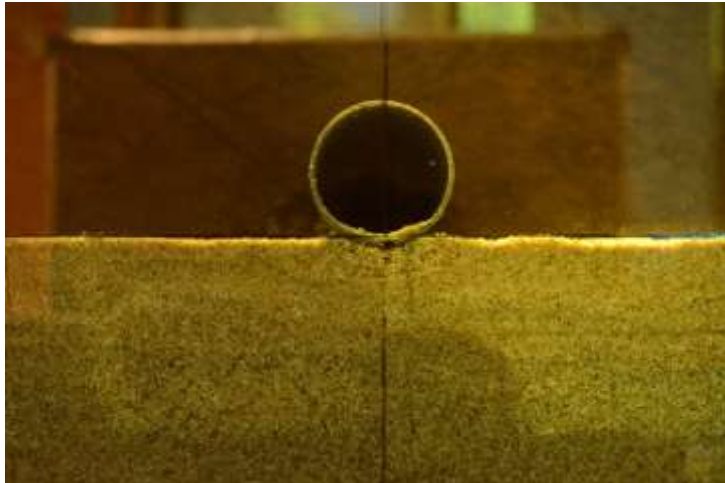




Gambar 4.23 Perubahan profil 2D *scouring* pipa kondisi *in-trench* 2 mm dengan  $H_{avg} = 6,57$  cm dan  $T_{avg} = 2,18$  s

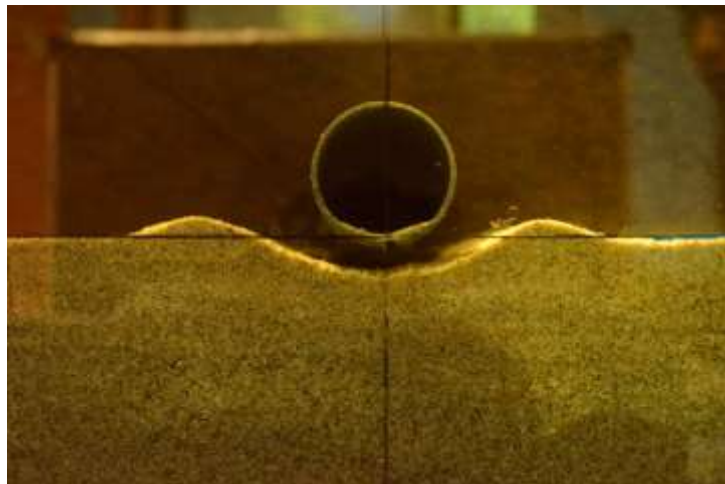
Pada grafik perubahan profil 2D *scouring* tersebut, posisi pipa berada pada koordinat 0,0. Koordinat jarak negatif merupakan daerah belakang pipa dan koordinat positif merupakan daerah depan pipa. Kondisi awal merupakan kondisi pada saat  $t = 0$  menit, dimana eksperimen belum dijalankan sehingga *scouring* belum terjadi sama sekali. Terbentuknya cekungan dalam profil 2D tersebut dikarenakan posisi awal pipa dengan kondisi *in-trench* 2 mm. Dalam eksperimen ini, *scouring* mulai terbentuk sejak 5 menit pertama. Kemudian *scouring* terus berkembang menjadi lebih dalam dan lebih lebar hingga eksperimen berakhir ( $t = 40$  menit).

Pengujian ketiga yang dilakukan untuk pipa dengan kondisi *in-trench* 2 mm ini adalah dengan  $H_i = 7$  cm dan  $T_i = 1$  detik yang menghasilkan  $H_{avg} = 6,95$  cm dan  $T_{avg} = 2,07$  s. Berikut adalah kondisi awal ( $t = 0$  menit) pipa sebelum pengujian dilakukan.



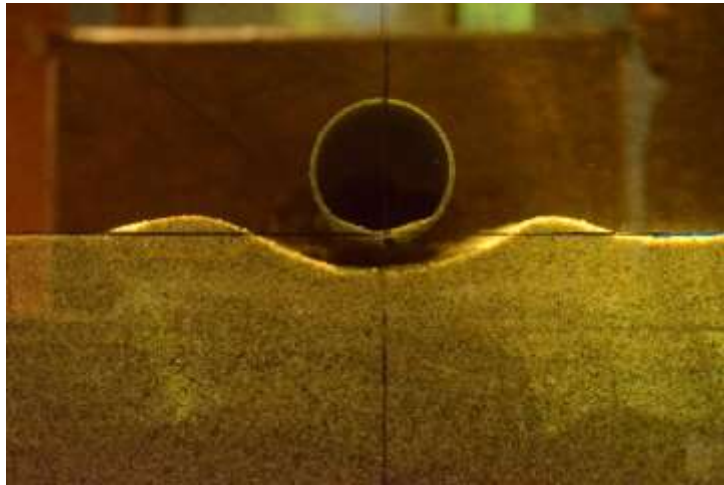
Gambar 4.24 Kondisi awal ( $t = 0$  menit) eksperimen *scouring* pada pipa kondisi *in-trench* 2 mm dengan  $H_{avg} = 6,95$  cm dan  $T_{avg} = 2,07$  s

Setelah eksperimen berjalan selama 20 menit, kedalaman *scouring* maksimum yang terbentuk adalah 0,92 cm dengan lebar *scouring* mencapai 5,80 cm. Berikut adalah profil *scouring* pada  $t = 20$  menit.



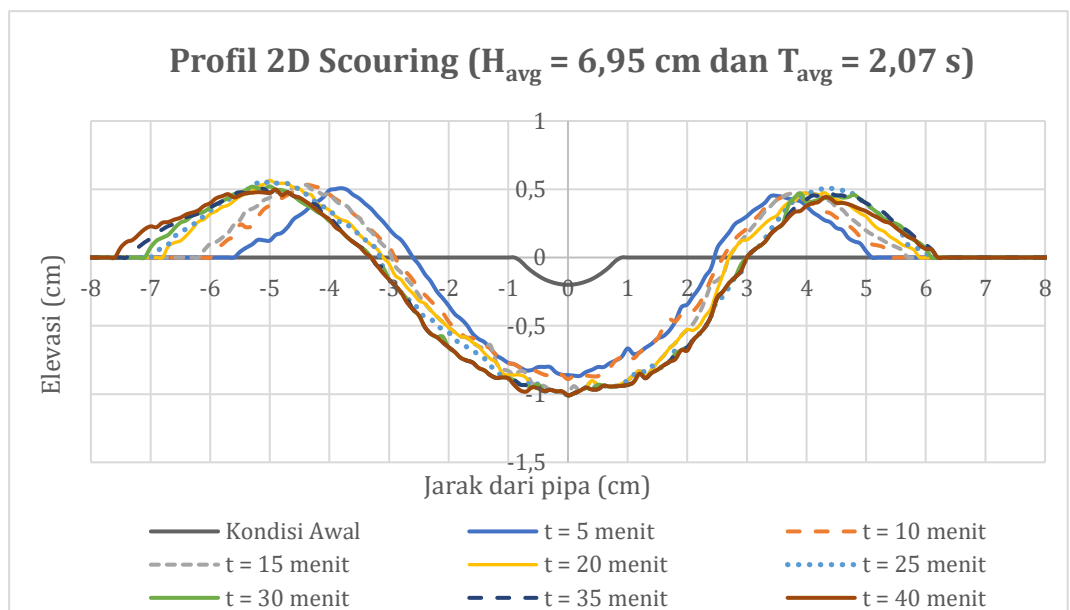
Gambar 4.25 Kondisi eksperimen *scouring* pada  $t = 20$  menit pada pipa kondisi *in-trench* 2 mm dengan  $H_{avg} = 6,95$  cm dan  $T_{avg} = 2,07$  s

Setelah eksperimen selesai dilakukan selama 40 menit, kondisi akhir kedalaman *scouring* maksimum yang terbentuk bertambah sedikit dari sebelumnya, menjadi 0,95 cm dengan lebar *scouring* mencapai 6,30 cm. Berikut adalah kondisi akhir profil *scouring* atau pada saat  $t = 40$  menit.



Gambar 4.26 Kondisi akhir ( $t = 40$  menit) eksperimen *scouring* pada pipa kondisi *in-trench* 2 mm dengan  $H_{avg} = 6,95$  cm dan  $T_{avg} = 2,07$  s

Setelah semua data pada AutoCAD sudah dimasukkan ke Microsoft Excel, berikut adalah perubahan profil 2D *scouring* mulai dari  $t = 0$  menit hingga  $t = 40$  menit.



Gambar 4.27 Perubahan profil 2D *scouring* pipa kondisi *in-trench* 2 mm dengan  $H_{avg} = 6,95$  cm dan  $T_{avg} = 2,07$  s

Pada grafik perubahan profil 2D *scouring* tersebut, posisi pipa berada pada koordinat 0,0. Koordinat jarak negatif merupakan daerah belakang pipa dan koordinat positif merupakan daerah depan pipa. Kondisi awal

merupakan kondisi pada saat  $t = 0$  menit, dimana eksperimen belum dijalankan sehingga *scouring* belum terjadi sama sekali. Terbentuknya cekungan dalam profil 2D pada kondisi awal tersebut dikarenakan posisi awal pipa dengan kondisi *in-trench* 2 mm. Dalam eksperimen ini, *scouring* mulai terbentuk sejak 5 menit pertama. Kemudian *scouring* terus berkembang menjadi lebih dalam dan lebih lebar hingga eksperimen berakhir ( $t = 40$  menit).

#### 4.3.3 Hasil Eksperimen *Scouring* untuk Pipa Kondisi *In-Trench* 3 mm

Pengujian pertama yang dilakukan untuk pipa dengan kondisi *in-trench* 3 mm ini adalah dengan  $H_i = 5$  cm dan  $T_i = 1$  detik yang menghasilkan  $H_{avg} = 5,99$  cm dan  $T_{avg} = 2,04$  s. Berikut adalah kondisi awal ( $t = 0$  menit) pipa sebelum pengujian dilakukan.



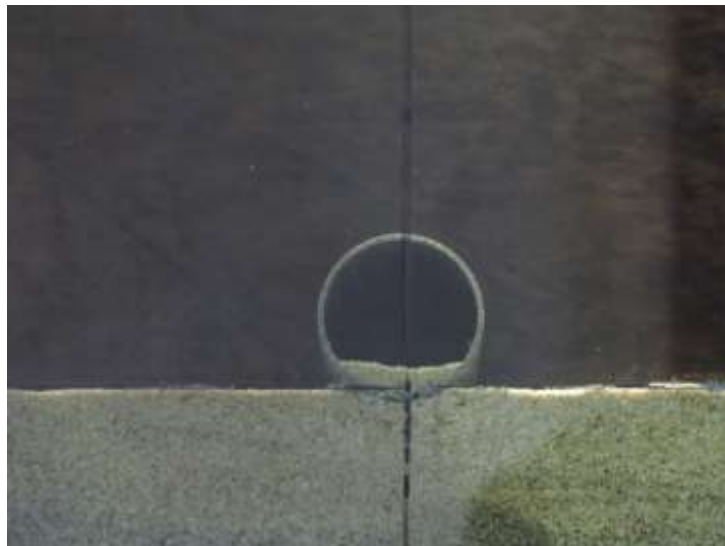
Gambar 4.28 Kondisi awal ( $t = 0$  menit) eksperimen *scouring* pada pipa kondisi *in-trench* 3 mm dengan  $H_{avg} = 5,99$  cm dan  $T_{avg} = 2,04$  s

Setelah eksperimen berjalan selama 20 menit, *scouring* belum terjadi. Tidak ada perubahan pada foto profil *scouring* sebelumnya, sehingga panjang dan lebar *scouring* adalah 0 (tidak terjadi *scouring*). Berikut adalah profil *scouring* pada  $t = 20$  menit.



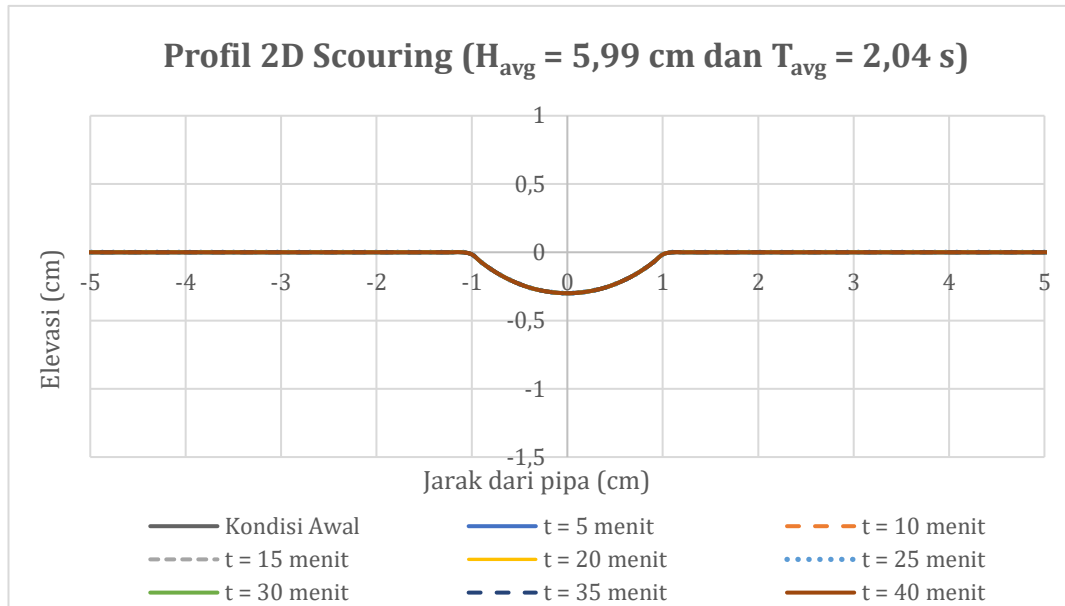
Gambar 4.29 Kondisi eksperimen *scouring* pada  $t = 20$  menit pada pipa kondisi *in-trench* 3 mm dengan  $H_{avg} = 5,99$  cm dan  $T_{avg} = 2,04$  s

Sampai eksperimen selesai dilakukan selama 40 menit, *scouring* tetap tidak terjadi. Sehingga, kondisi akhir kedalaman *scouring* yang terbentuk adalah 0 cm dengan lebar *scouring* juga 0 cm. Berikut adalah kondisi akhir profil *scouring* atau pada saat  $t = 40$  menit.



Gambar 4.30 Kondisi akhir ( $t = 40$  menit) eksperimen *scouring* pada pipa kondisi *in-trench* 3 mm dengan  $H_{avg} = 5,99$  cm dan  $T_{avg} = 2,04$  s

Setelah semua data pada AutoCAD sudah dimasukkan ke Microsoft Excel, berikut adalah perubahan profil 2D *scouring* mulai dari  $t = 0$  menit hingga  $t = 40$  menit.



Gambar 4.31 Perubahan profil 2D *scouring* pipa kondisi *in-trench* 3 mm dengan  $H_{avg} = 5,99$  cm dan  $T_{avg} = 2,04$  s

Pada grafik perubahan profil 2D *scouring* tersebut, posisi pipa berada pada koordinat 0,0. Koordinat jarak negatif merupakan daerah belakang pipa dan koordinat positif merupakan daerah depan pipa. Karena tidak terjadi *scouring* sama sekali, maka profil 2D *scouring* dari awal sampai akhir adalah sama atau tidak berubah sedikit pun.

Pengujian kedua yang dilakukan untuk pipa dengan kondisi *in-trench* 3 mm ini adalah dengan  $H_i = 6$  cm dan  $T_i = 1$  detik yang menghasilkan  $H_{avg} = 6,48$  cm dan  $T_{avg} = 2,16$  s. Berikut adalah kondisi awal ( $t = 0$  menit) pipa sebelum pengujian dilakukan.



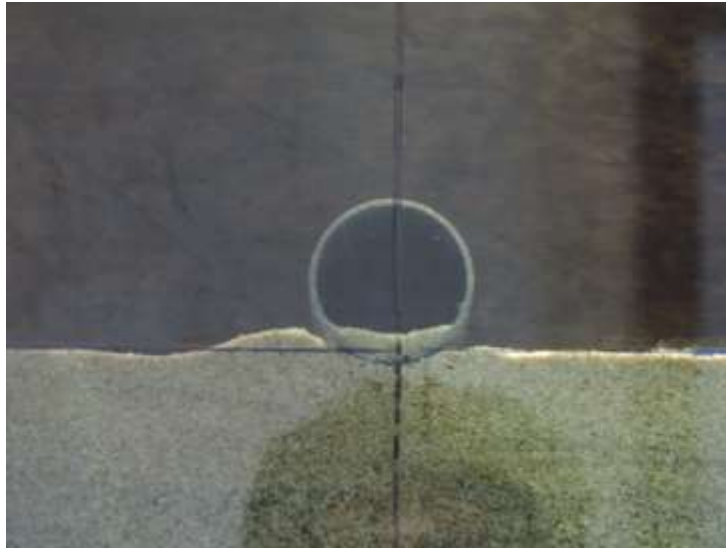
Gambar 4.32 Kondisi awal ( $t = 0$  menit) eksperimen *scouring* pada pipa kondisi *in-trench* 3 mm dengan  $H_{avg} = 6,48$  cm dan  $T_{avg} = 2,16$  s

Setelah eksperimen berjalan selama 20 menit, kedalaman *scouring* maksimum yang terbentuk sangat kecil, yaitu hanya 0,06 cm dengan lebar *scouring* hanya 2,00 cm. Berikut adalah profil *scouring* pada  $t = 20$  menit.



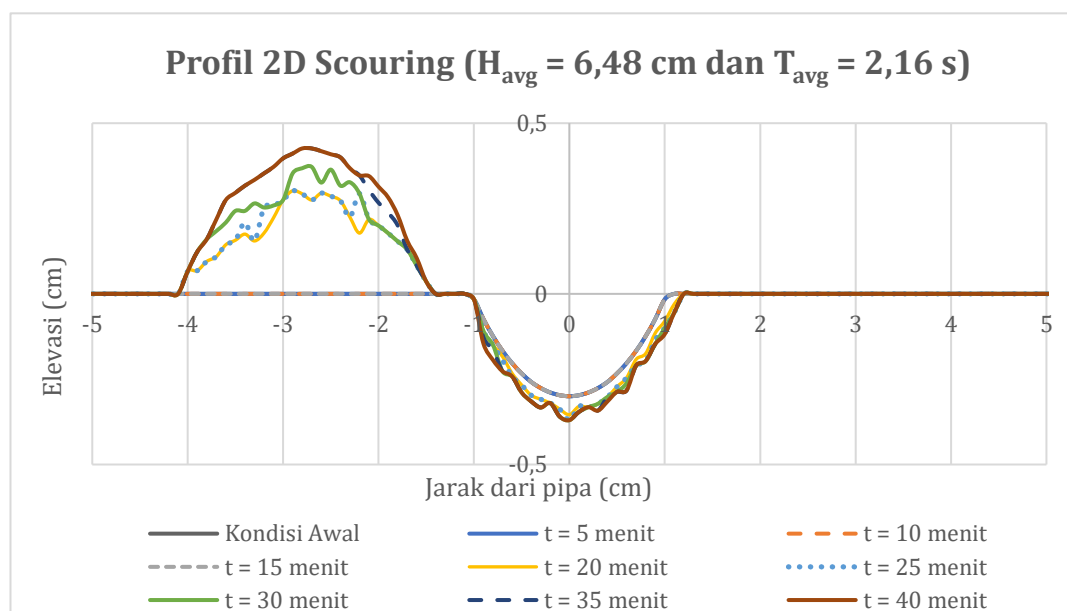
Gambar 4.33 Kondisi eksperimen *scouring* pada  $t = 20$  menit pada pipa kondisi *in-trench* 3 mm dengan  $H_{avg} = 6,48$  cm dan  $T_{avg} = 2,16$  s

Setelah eksperimen selesai dilakukan selama 40 menit, kondisi akhir kedalaman *scouring* maksimum yang terbentuk hanya mencapai 0,10 cm dengan lebar *scouring* hanya bertambah sedikit dari sebelumnya, yaitu 2,20 cm. Berikut adalah kondisi akhir profil *scouring* atau pada saat  $t = 40$  menit.



Gambar 4.34 Kondisi akhir ( $t = 40$  menit) eksperimen *scouring* pada pipa kondisi *in-trench* 3 mm dengan  $H_{avg} = 6,48$  cm dan  $T_{avg} = 2,16$  s

Setelah semua data pada AutoCAD sudah dimasukkan ke Microsoft Excel, berikut adalah laju propagasi *scouring* mulai dari  $t = 0$  menit hingga  $t = 40$  menit.



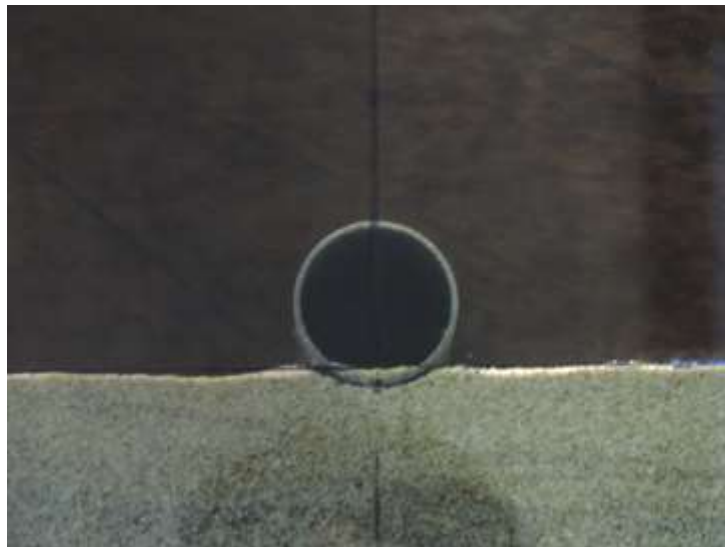
Gambar 4.35 Perubahan profil 2D *scouring* pipa kondisi *in-trench* 3 mm dengan  $H_{avg} = 6,48$  cm dan  $T_{avg} = 2,16$  s

Pada grafik perubahan profil 2D *scouring* tersebut, posisi pipa berada pada koordinat 0,0. Koordinat jarak negatif merupakan daerah belakang pipa dan koordinat positif merupakan daerah depan pipa. Terbentuknya



cekungan dalam profil 2D pada kondisi awal tersebut dikarenakan posisi awal pipa dengan kondisi *in-trench* 3 mm. Pada saat 15 menit pertama, *scouring* belum terjadi, sehingga profil 15 menit pertama sama dengan profil kondisi awal ( $t = 0$ ). *Scouring* mulai terjadi pada menit ke-20 dan terus mengalami pengembangan hingga menit ke-40.

Pengujian ketiga yang dilakukan untuk pipa dengan kondisi *in-trench* 3 mm ini adalah dengan  $H_i = 7$  cm dan  $T_i = 1$  detik yang menghasilkan  $H_{avg} = 7,05$  cm dan  $T_{avg} = 2,06$  s. Berikut adalah kondisi awal ( $t = 0$  menit) pipa sebelum pengujian dilakukan.



Gambar 4.36 Kondisi awal ( $t = 0$  menit) eksperimen *scouring* pada pipa kondisi *in-trench* 3 mm dengan  $H_{avg} = 7,05$  cm dan  $T_{avg} = 2,06$  s

Setelah eksperimen berjalan selama 20 menit, kedalaman *scouring* maksimum yang terbentuk sangat kecil, yaitu hanya 0,19 cm dengan lebar *scouring* hanya 2,64 cm. Berikut adalah profil *scouring* pada  $t = 20$  menit.



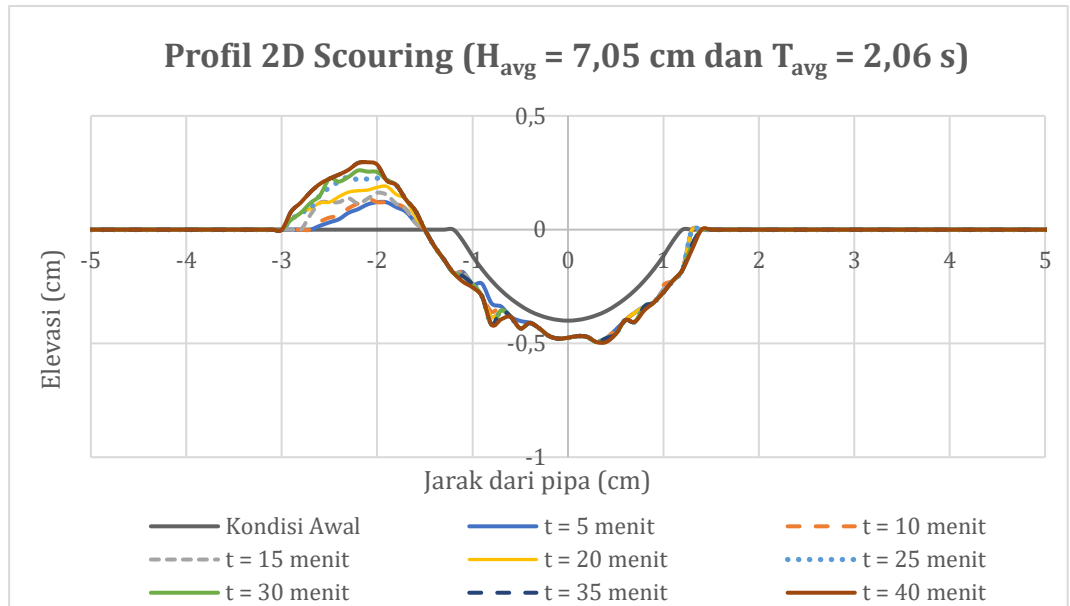
Gambar 4.37 Kondisi eksperimen *scouring* pada  $t = 20$  menit pada pipa kondisi *in-trench* 3 mm dengan  $H_{avg} = 7,05$  cm dan  $T_{avg} = 2,06$  s

Setelah eksperimen selesai dilakukan selama 40 menit, kondisi akhir kedalaman *scouring* maksimum yang terbentuk hanya bertambah sedikit dari sebelumnya, yaitu 0,20 cm dengan lebar *scouring* bertambah menjadi 2,85 cm. Berikut adalah kondisi akhir profil *scouring* atau pada saat  $t = 40$  menit.



Gambar 4.38 Kondisi akhir ( $t = 40$  menit) eksperimen *scouring* pada pipa kondisi *in-trench* 3 mm dengan  $H_{avg} = 7,05$  cm dan  $T_{avg} = 2,06$  s

Setelah semua data pada AutoCAD sudah dimasukkan ke Microsoft Excel, berikut adalah perubahan profil 2D *scouring* mulai dari  $t = 0$  menit hingga  $t = 40$  menit.

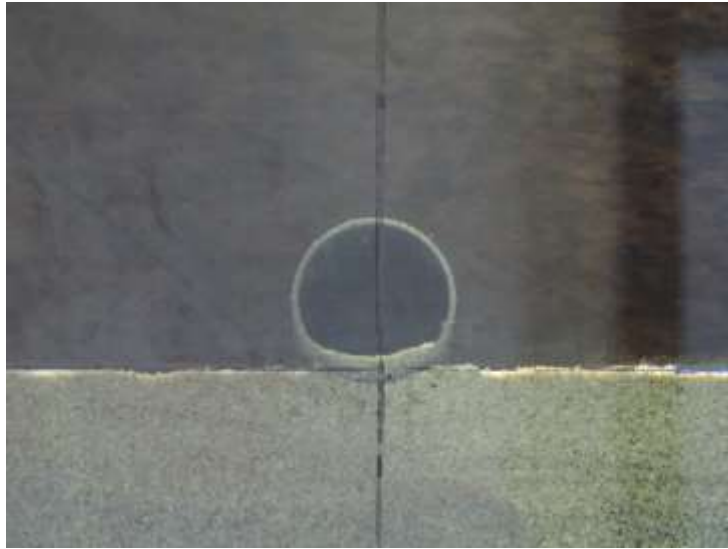


Gambar 4.39 Perubahan profil 2D *scouring* pipa kondisi *in-trench* 3 mm dengan  $H_{avg} = 7,05$  cm dan  $T_{avg} = 2,06$  s

Pada grafik perubahan profil 2D *scouring* tersebut, posisi pipa berada pada koordinat 0,0. Koordinat jarak negatif merupakan daerah belakang pipa dan koordinat positif merupakan daerah depan pipa. Terbentuknya cekungan dalam profil 2D pada kondisi awal tersebut dikarenakan posisi awal pipa dengan kondisi *in-trench* 3 mm. *Scouring* mulai terjadi pada menit ke-5 dan terus mengalami pengembangan hingga menit ke-40.

#### 4.3.4 Hasil Eksperimen *Scouring* untuk Pipa Kondisi *In-Trench* 4 mm

Pengujian pertama yang dilakukan untuk pipa dengan kondisi *in-trench* 4 mm ini adalah dengan  $H_i = 5$  cm dan  $T_i = 1$  detik yang menghasilkan  $H_{avg} = 5,22$  cm dan  $T_{avg} = 2,01$  s. Berikut adalah kondisi awal ( $t = 0$  menit) pipa sebelum pengujian dilakukan.



Gambar 4.40 Kondisi awal ( $t = 0$  menit) eksperimen *scouring* pada pipa kondisi *in-trench* 4 mm dengan  $H_{avg} = 5,22$  cm dan  $T_{avg} = 2,02$  s

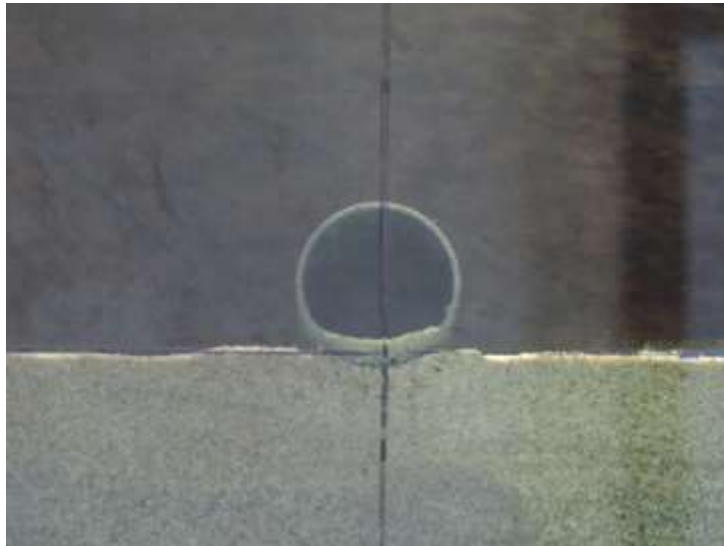
Setelah eksperimen berjalan selama 20 menit, *scouring* belum terjadi. Tidak ada perubahan pada foto profil *scouring* sebelumnya, sehingga panjang dan lebar *scouring* adalah 0 (tidak terjadi *scouring*). Berikut adalah profil *scouring* pada  $t = 20$  menit.



Gambar 4.41 Kondisi eksperimen *scouring* pada  $t = 20$  menit pada pipa kondisi *in-trench* 4 mm dengan  $H_{avg} = 5,22$  cm dan  $T_{avg} = 2,02$  s

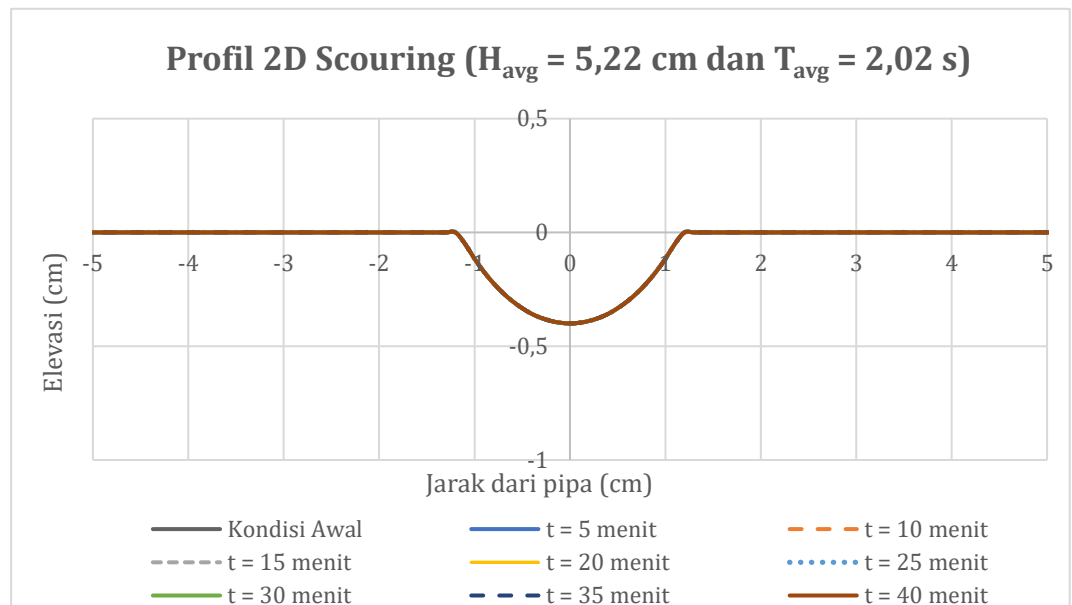
Sampai eksperimen selesai dilakukan selama 40 menit, *scouring* tetap tidak terjadi. Sehingga, kondisi akhir kedalaman *scouring* yang terbentuk

adalah 0 cm dengan lebar *scouring* juga 0 cm. Berikut adalah kondisi akhir profil *scouring* atau pada saat  $t = 40$  menit.



Gambar 4.42 Kondisi akhir ( $t = 40$  menit) eksperimen *scouring* pada pipa kondisi *in-trench* 4 mm dengan  $H_{avg} = 5,22$  cm dan  $T_{avg} = 2,02$  s

Setelah semua data pada AutoCAD sudah dimasukkan ke Microsoft Excel, berikut adalah perubahan profil 2D *scouring* mulai dari  $t = 0$  menit hingga  $t = 40$  menit.



Gambar 4.43 Perubahan profil 2D *scouring* pipa kondisi *in-trench* 4 mm dengan  $H_{avg} = 5,22$  cm dan  $T_{avg} = 2,02$  s

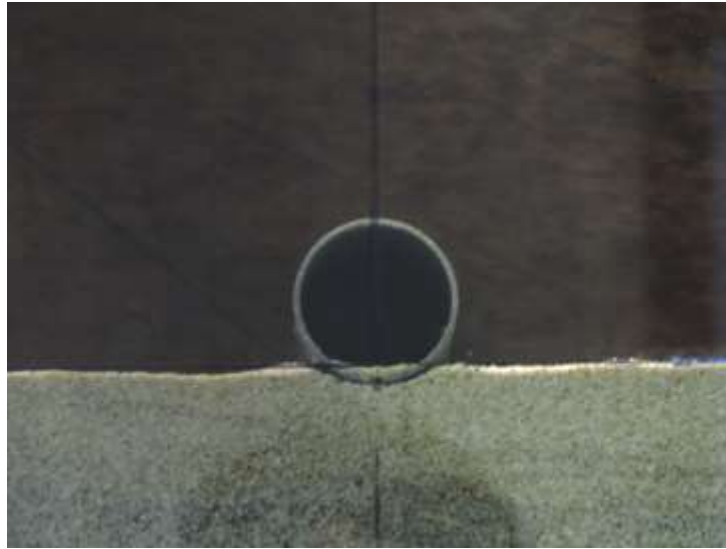
Pada grafik perubahan profil 2D *scouring* tersebut, posisi pipa berada pada koordinat 0,0. Koordinat jarak negatif merupakan daerah belakang pipa dan koordinat positif merupakan daerah depan pipa. Terbentuknya cekungan dalam profil 2D pada kondisi awal tersebut dikarenakan posisi awal pipa dengan kondisi *in-trench* 4 mm. Karena tidak terjadi *scouring* sama sekali, maka profil 2D *scouring* dari awal sampai akhir adalah sama.

Pengujian kedua yang dilakukan untuk pipa dengan kondisi *in-trench* 4 mm ini adalah dengan  $H_i = 6$  cm dan  $T_i = 1$  detik yang menghasilkan  $H_{avg} = 6,08$  cm dan  $T_{avg} = 2,17$  s. Berikut adalah kondisi awal ( $t = 0$  menit) pipa sebelum pengujian dilakukan.



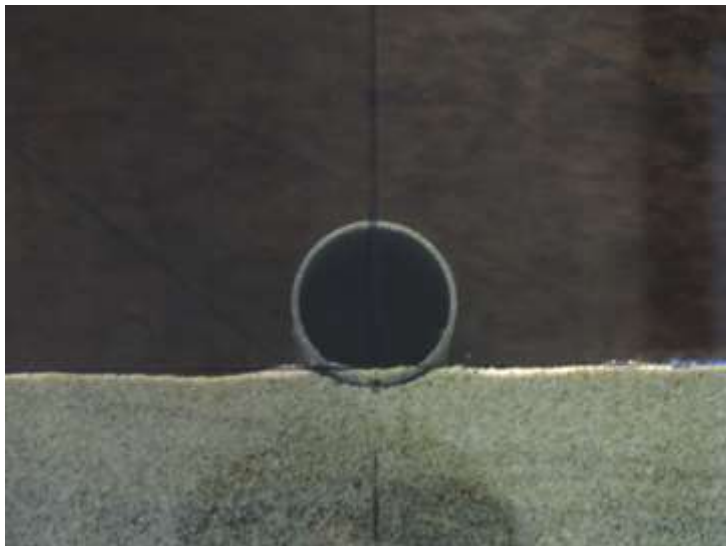
Gambar 4.44 Kondisi awal ( $t = 0$  menit) eksperimen *scouring* pada pipa kondisi *in-trench* 4 mm dengan  $H_{avg} = 6,08$  cm dan  $T_{avg} = 2,17$  s

Setelah eksperimen berjalan selama 20 menit, *scouring* belum terjadi. Tidak ada perubahan pada foto profil *scouring* sebelumnya, sehingga panjang dan lebar *scouring* adalah 0 (tidak terjadi *scouring*). Berikut adalah profil *scouring* pada  $t = 20$  menit.



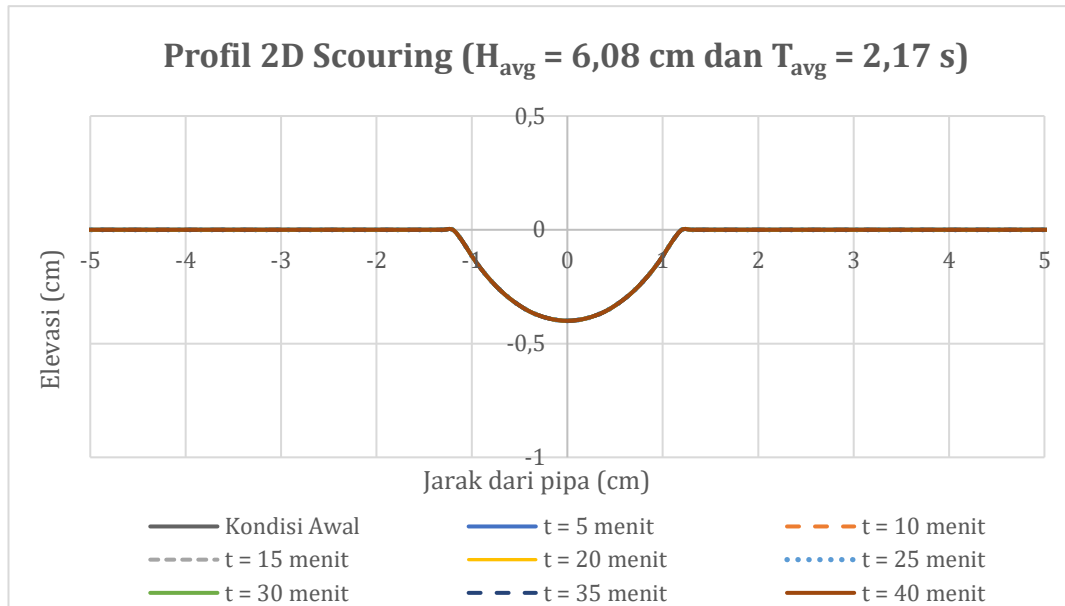
Gambar 4.45 Kondisi eksperimen *scouring* pada  $t = 20$  menit pada pipa kondisi *in-trench* 4 mm dengan  $H_{avg} = 6,08$  cm dan  $T_{avg} = 2,17$  s

Sampai eksperimen selesai dilakukan selama 40 menit, *scouring* tetap tidak terjadi. Sehingga, kondisi akhir kedalaman *scouring* yang terbentuk adalah 0 cm dengan lebar *scouring* juga 0 cm. Berikut adalah kondisi akhir profil *scouring* atau pada saat  $t = 40$  menit.



Gambar 4.46 Kondisi akhir ( $t = 40$  menit) eksperimen *scouring* pada pipa kondisi *in-trench* 4 mm dengan  $H_{avg} = 6,08$  cm dan  $T_{avg} = 2,17$  s

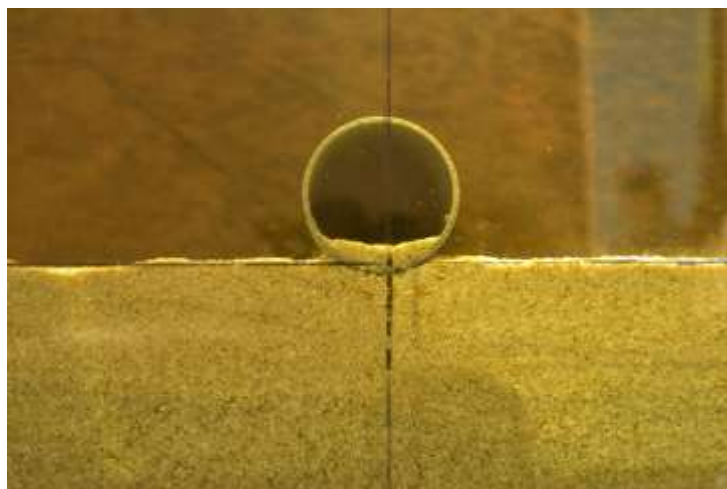
Setelah semua data pada AutoCAD sudah dimasukkan ke Microsoft Excel, berikut adalah perubahan profil 2D *scouring* mulai dari  $t = 0$  menit hingga  $t = 40$  menit.



Gambar 4.47 Perubahan profil 2D *scouring* pipa kondisi *in-trench* 4 mm dengan  $H_{avg} = 6,08$  cm dan  $T_{avg} = 2,17$  s

Pada grafik perubahan profil 2D *scouring* tersebut, posisi pipa berada pada koordinat 0,0. Karena tidak terjadi *scouring* sama sekali, maka profil 2D *scouring* dari awal sampai akhir adalah sama.

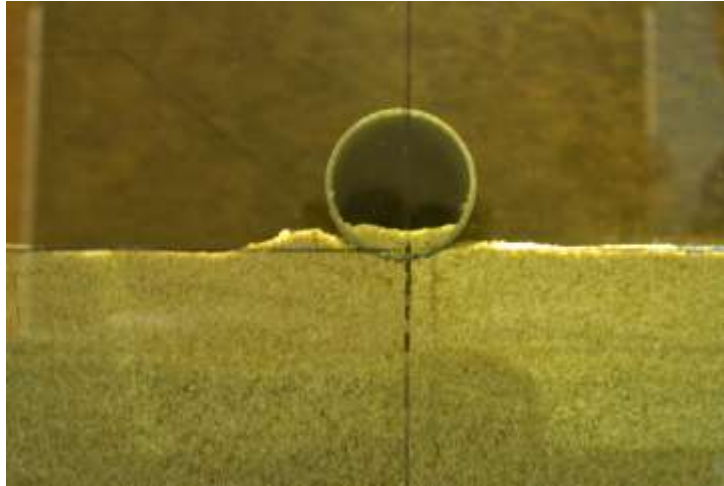
Pengujian ketiga yang dilakukan untuk pipa dengan kondisi *in-trench* 4 mm ini adalah dengan  $H_i = 7$  cm dan  $T_i = 1$  detik yang menghasilkan  $H_{avg} = 6,66$  cm dan  $T_{avg} = 2,07$  s. Berikut adalah kondisi awal ( $t = 0$  menit) pipa sebelum pengujian dilakukan.



Gambar 4.48 Kondisi awal ( $t = 0$  menit) eksperimen *scouring* pada pipa kondisi *in-trench* 4 mm dengan  $H_{avg} = 6,66$  cm dan  $T_{avg} = 2,07$  s

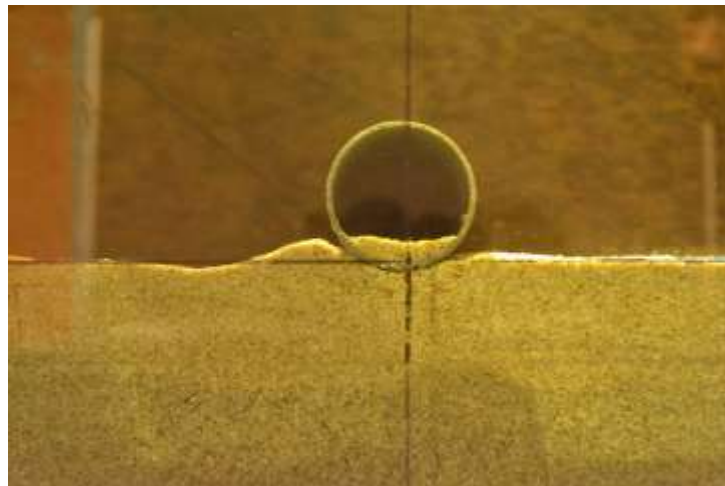


Setelah eksperimen berjalan selama 20 menit, kedalaman *scouring* maksimum yang terbentuk sangat kecil, yaitu hanya 0,12 cm dengan lebar *scouring* hanya 2,00 cm. Berikut adalah profil *scouring* pada  $t = 20$  menit.



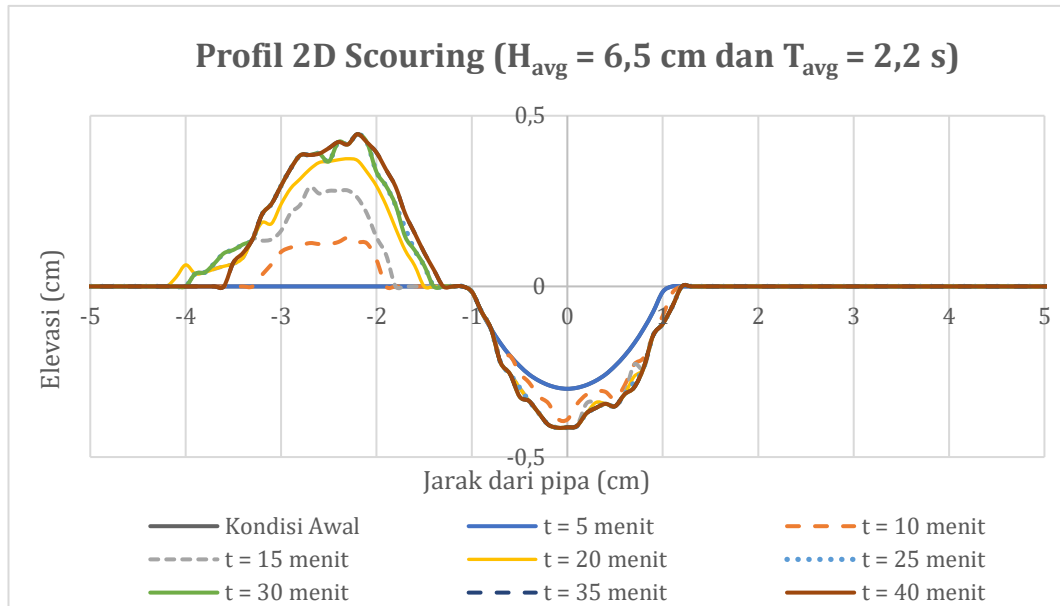
Gambar 4.49 Kondisi eksperimen *scouring* pada  $t = 20$  menit pada pipa kondisi *in-trench* 4 mm dengan  $H_{avg} = 6,66$  cm dan  $T_{avg} = 2,07$  s

Setelah eksperimen selesai dilakukan selama 40 menit, kondisi akhir kedalaman *scouring* maksimum yang terbentuk hanya bertambah sedikit dari sebelumnya, yaitu 0,13 cm. Lebar *scouring* bertambah menjadi 2,20 cm. Berikut adalah kondisi akhir profil *scouring* atau pada saat  $t = 40$  menit.



Gambar 4.50 Kondisi akhir ( $t = 40$  menit) eksperimen *scouring* pada pipa kondisi *in-trench* 4 mm dengan  $H_{avg} = 6,66$  cm dan  $T_{avg} = 2,07$  s

Setelah semua data pada AutoCAD sudah dimasukkan ke Microsoft Excel, berikut adalah perubahan profil 2D *scouring* mulai dari  $t = 0$  menit hingga  $t = 40$  menit.



Gambar 4.51 Perubahan profil 2D *scouring* pipa kondisi *in-trench* 4 mm dengan  $H_{avg} = 6,66$  cm dan  $T_{avg} = 2,07$  s

Pada grafik perubahan profil 2D *scouring* tersebut, posisi pipa berada pada koordinat 0,0. Koordinat jarak negatif merupakan daerah belakang pipa dan koordinat positif merupakan daerah depan pipa. Terbentuknya cekungan dalam profil 2D pada kondisi awal tersebut dikarenakan posisi awal pipa dengan kondisi *in-trench* 3 mm. Pada 5 menit pertama, *scouring* belum terjadi. *Scouring* mulai terjadi pada menit ke-10 dan terus mengalami pengembangan hingga menit ke-40.

#### 4.4 Hasil Perhitungan Laju Propagasi *Scouring*

Perhitungan laju propagasi *scouring* dapat dilihat pada persamaan 2.16 dengan bantuan persamaan 2.9 untuk perhitungan bilangan Keulegan-Carpenter (KC) dan persamaan 2.26 untuk perhitungan *shield parameter* ( $\theta$ ). Arah datang gelombang adalah tegak lurus dengan posisi pipa ( $\alpha$ ) dengan slope 1:10 ( $\tan \phi = 1:10$ ). Nilai dari *specific gravity* dan  $d_{50}$  juga sudah diketahui dari pengujian tanah sebelumnya. Berikut adalah hasil perhitungan laju propagasi *scouring* untuk semua variasi.

Tabel 4.4 Hasil perhitungan laju propagasi *scouring* pada setiap variasi eksperimen

No	$K_w(1 - \frac{e}{D(1 + \sin(\alpha))})$	$g(s-1)d_{50}^3$	$\frac{D \tan \phi}{\phi}$	$\theta_w$	KC	$V_h$
1	11,300	3,02E-09	0,004	0,036	5,387	0,0015
2	11,300	3,02E-09	0,004	0,045	6,366	0,0023
3	11,300	3,02E-09	0,004	0,050	6,717	0,0029
4	12,486	3,02E-09	0,004	0,037	5,579	0,0018
5	12,486	3,02E-09	0,004	0,047	6,909	0,0029
6	12,486	3,02E-09	0,004	0,051	6,881	0,0033
7	13,080	3,02E-09	0,004	0,041	5,935	0,0000
8	13,080	3,02E-09	0,004	0,046	6,606	0,0029
9	13,080	3,02E-09	0,004	0,051	6,766	0,0035
10	13,673	3,02E-09	0,004	0,033	4,903	0,0000
11	13,673	3,02E-09	0,004	0,041	5,961	0,0000
12	13,673	3,02E-09	0,004	0,047	6,400	0,0031

Pada Tabel 4.4 diatas, terdapat tiga variasi dengan nilai laju propagasi 0 (nol), yang artinya *scouring* tidak merambat sepanjang pipa. Pada pengukuran kedalaman dan lebar *scouring* sebelumnya, juga terdapat tiga variasi tersebut yang tidak mengalami perubahan profil, sehingga tidak terjadi *scouring*. Oleh karena itu, apabila *scouring* tidak terjadi, maka *scouring* tidak merambat di sepanjang pipa, sehingga laju propagasi *scouring* bernilai nol.

#### 4.5 Validasi Hasil Eksperimen dengan Rumus Empiris

Dalam eksperimen ini, perlu juga dilakukan validasi dengan rumus empiris. Tujuan validasi ini untuk membandingkan hasil eksperimen yang dilakukan dengan hasil perhitungan teori. Hasil eksperimen yang akan divalidasi dengan rumus empiris adalah kedalaman dan lebar *scouring* pada setiap variasi eksperimen.

Untuk menghitung kedalaman dan lebar *scouring*, harus mengetahui nilai nilai dari *wave number*, dapat menggunakan persamaan 2.7 sdengan menggunakan metode iterasi. Berikut adalah tabel perhitungan k untuk semua variasi eksperimen.

Tabel 4.5 Hasil perhitungan k pada setiap variasi eksperimen

Percobaan		T <sub>p</sub>	g	k <sub>p</sub>	h	$\omega_p^2$	g k <sub>p</sub> tanh (k <sub>p</sub> h)	Error (%)
H <sub>avg</sub> (cm)	T <sub>avg</sub> (s)							
5,55	2,02	1,54	9,81	2,324	0,40	16,65	16,652	0,035
6,37	2,15	1,57	9,81	2,268	0,40	16,02	16,015	0,010
6,92	2,06	1,54	9,81	2,324	0,40	16,65	16,652	0,035
5,63	2,03	1,56	9,81	2,286	0,40	16,22	16,219	0,019
6,57	2,18	1,62	9,81	2,181	0,40	15,04	15,032	0,070
6,95	2,07	1,56	9,81	2,286	0,40	16,22	16,219	0,019
5,99	2,04	1,56	9,81	2,286	0,40	16,22	16,219	0,019
6,48	2,16	1,59	9,81	2,233	0,40	15,62	15,618	0,015
7,05	2,06	1,53	9,81	2,343	0,40	16,86	16,869	0,028
5,22	2,01	1,51	9,81	2,382	0,40	17,31	17,316	0,012
6,08	2,17	1,55	9,81	2,305	0,40	16,43	16,435	0,019
6,66	2,07	1,53	9,81	2,343	0,40	16,86	16,869	0,028

Selanjutnya adalah melakukan perhitungan KC dengan menggunakan persamaan 2.9 . Berikut adalah tabel hasil perhitungan KC tersebut.

Tabel 4.6 Hasil perhitungan KC pada setiap variasi eksperimen

Percobaan		T <sub>p</sub>	k <sub>p</sub>	$\omega_p$	H <sub>rms</sub>	A <sub>rms</sub>	U <sub>rms</sub>	U <sub>m</sub>	KC
H <sub>avg</sub> (cm)	T <sub>avg</sub> (s)								
5,55	2,02	1,54	2,32	4,08	0,049	0,023	0,094	0,133	5,387
6,37	2,15	1,57	2,27	4,00	0,057	0,027	0,109	0,154	6,366
6,92	2,06	1,54	2,32	4,08	0,062	0,029	0,118	0,166	6,717
5,63	2,03	1,56	2,29	4,03	0,050	0,024	0,096	0,136	5,579
6,57	2,18	1,62	2,18	3,88	0,059	0,030	0,115	0,162	6,909
6,95	2,07	1,56	2,29	4,03	0,062	0,030	0,119	0,168	6,881
5,99	2,04	1,56	2,29	4,03	0,053	0,025	0,102	0,145	5,935
6,48	2,16	1,59	2,23	3,95	0,058	0,028	0,112	0,158	6,606
7,05	2,06	1,53	2,34	4,11	0,063	0,029	0,119	0,168	6,766
5,22	2,01	1,51	2,38	4,16	0,046	0,021	0,087	0,124	4,903
6,08	2,17	1,55	2,31	4,05	0,054	0,026	0,104	0,147	5,961
6,66	2,07	1,53	2,34	4,11	0,059	0,027	0,113	0,159	6,400

Setelah KC sudah didapat, perhitungan kedalaman dan lebar *scouring* dapat dilakukan. Untuk menghitung kedalaman *scouring*, dapat menggunakan rumus persamaan 2.10, sedangkan lebar *scouring* menggunakan rumus persamaan 2.15. Berikut adalah validasi hasil eksperimen dengan perhitungan menggunakan rumus empiris.

Tabel 4.7 Hasil validasi kedalaman *scouring*

Percobaan		D (cm)	KC	e/D	S <sub>emp</sub> /D	S <sub>exp</sub> (cm)	S <sub>exp</sub> /D	Error (%)
H <sub>avg</sub> (cm)	T <sub>avg</sub> (s)							
5,55	2,02	3,81	5,387	0,000	0,245	0,86	0,226	7,844
6,37	2,15	3,81	6,366	0,000	0,266	1,04	0,273	2,468
6,92	2,06	3,81	6,717	0,000	0,274	1,05	0,276	0,694
5,63	2,03	3,81	5,579	-0,052	0,253	0,74	0,194	23,239
6,57	2,18	3,81	6,909	-0,052	0,282	0,84	0,220	21,754
6,95	2,07	3,81	6,881	-0,052	0,281	0,95	0,249	11,328

Tabel 4.8 Hasil validasi lebar *scouring*

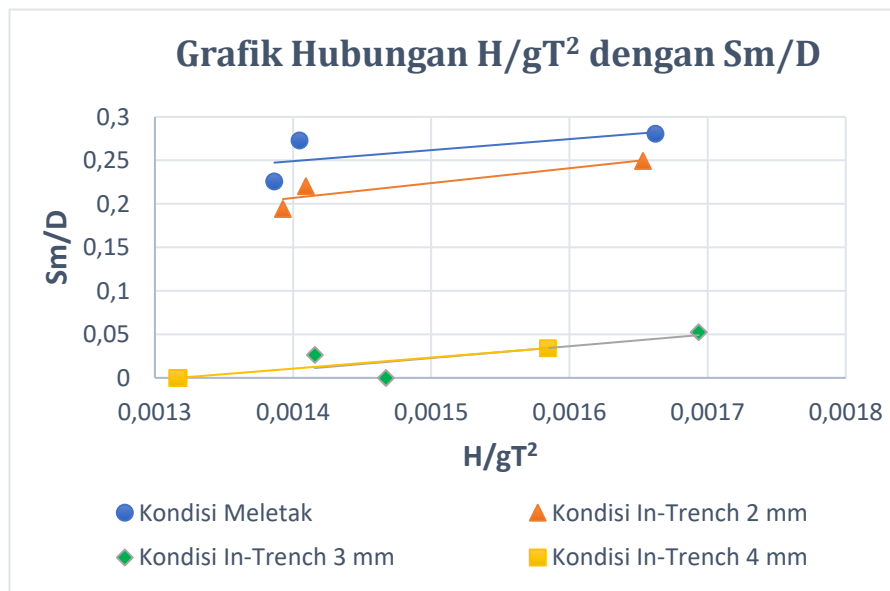
Percobaan		D (cm)	KC	e/D	W <sub>emp</sub> /D	W <sub>exp</sub> (cm)	W <sub>exp</sub> /D	Error (%)
H <sub>avg</sub> (cm)	T <sub>avg</sub> (s)							
5,55	2,02	3,81	5,387	0,000	1,046	4,93	1,294	23,734
6,37	2,15	3,81	6,366	0,000	1,166	6,90	1,811	55,369
6,92	2,06	3,81	6,717	0,000	1,207	7,60	1,995	65,254
5,63	2,03	3,81	5,579	-0,052	1,070	5,00	1,312	22,670
6,57	2,18	3,81	6,909	-0,052	1,229	5,65	1,483	20,623
6,95	2,07	3,81	6,881	-0,052	1,226	6,30	1,654	34,853

S<sub>emp</sub> merupakan nilai kedalaman *scouring* maksimum berdasarkan perhitungan empiris, sedangkan S<sub>exp</sub> merupakan nilai kedalaman *scouring* maksimum berdasarkan eksperimen yang diukur dari ujung pipa paling bawah sampai menyentuh sedimen (*seabed*). Begitu pula W<sub>emp</sub> merupakan nilai lebar *scouring* maksimum berdasarkan perhitungan empiris, sedangkan W<sub>exp</sub> merupakan nilai lebar *scouring* maksimum berdasarkan eksperimen yang diukur dari ujung *seabed* yang tererosi sebelah kiri hingga ujung sebelah kanan.

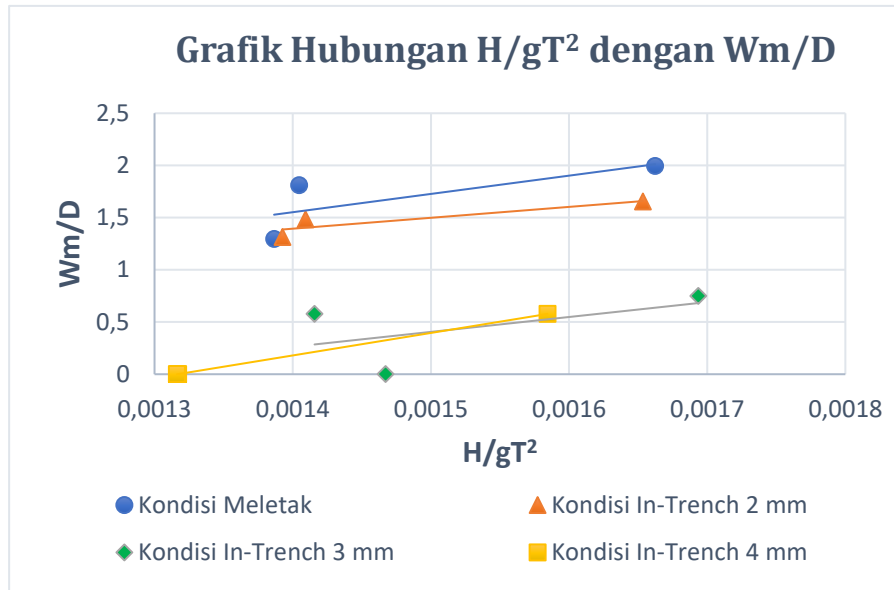
Berdasarkan hasil validasi kedalaman *scouring*, pipa dengan kondisi meletak dan *in-trench* 2 mm mempunyai nilai *error* yang tidak terlalu besar yaitu maksimum 24% . Berdasarkan hasil validasi lebar *scouring*, nilai *error* berkisar antara 20% – 66%. Nilai *error* yang besar untuk validasi lebar *scouring* ini disebabkan karena tidak adanya pengaruh  $e/D$  dalam rumus empiris pada persamaan 2.15 tersebut, sehingga kurang cocok untuk digunakan pada eksperimen ini.

#### 4.6 Analisa Hubungan *Scouring* dengan Parameter Tak Berdimensi

Hasil dari eksperimen *scouring* pada pipa diatas meliputi sketsa laju propagasi *scouring*, data kedalaman dan lebar *scouring* maksimum. Data-data tersebut dapat diplot dengan beberapa parameter tak berdimensi. Parameter tak berdimensi tersebut diantaranya adalah *wave steepness parameter* ( $H/gT^2$ ). *Wave steepness* ini menunjukkan pengaruh tinggi gelombang dan periode terhadap *scouring*. Berikut adalah grafik hubungan antara *scouring* dengan *wave steepness parameter* ( $H / gT^2$ ).



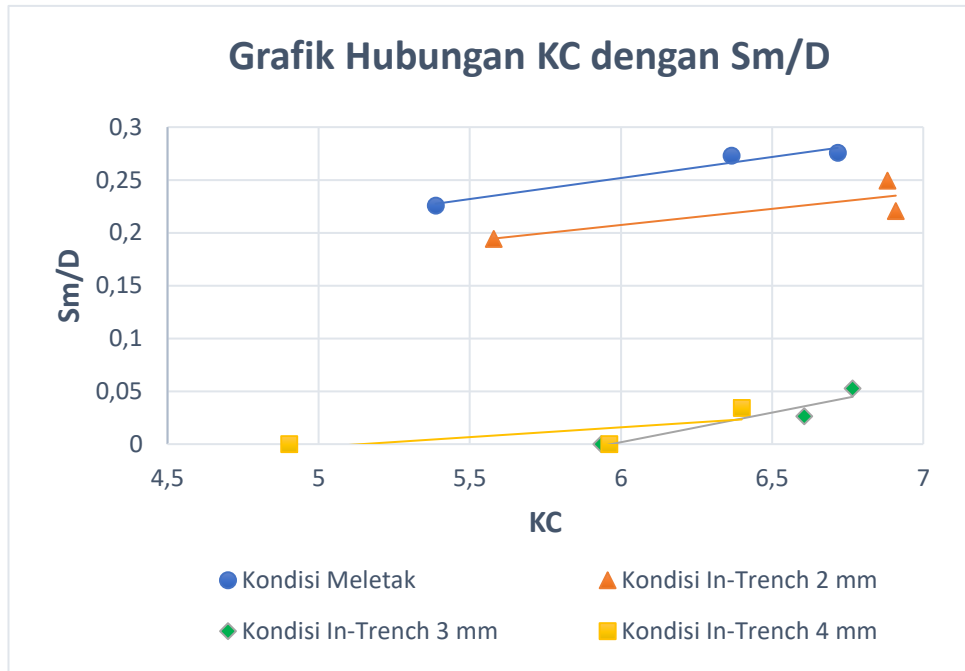
Gambar 4.52 Grafik hubungan antara *wave steepness parameter* ( $H/gT^2$ ) dengan *non dimensional scour depth* ( $S_m/D$ )



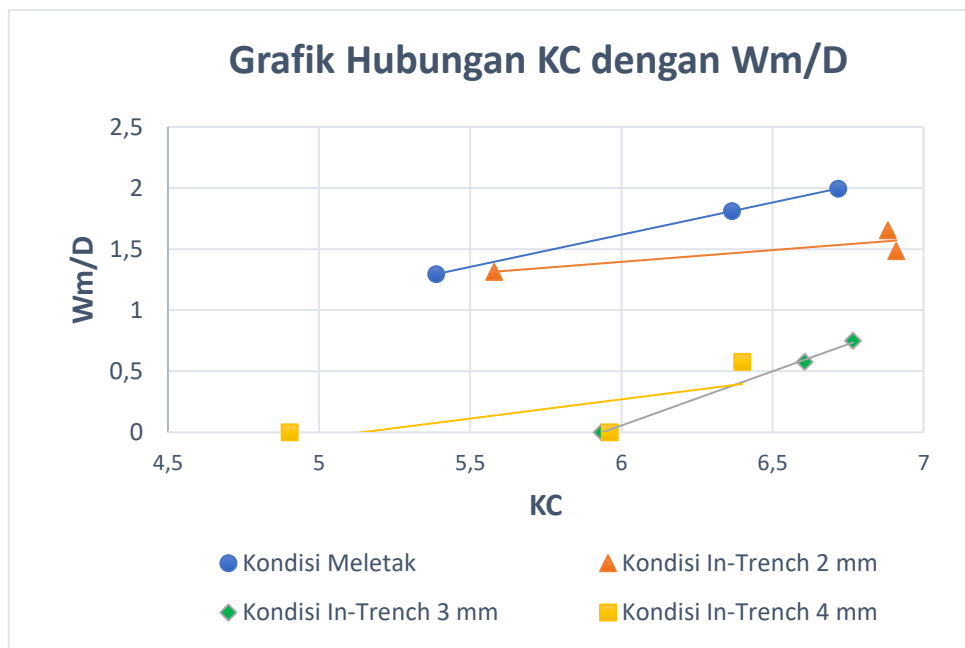
Gambar 4.53 Grafik hubungan antara *wave steepness parameter* ( $H/gT^2$ ) dengan *non dimensional scour width* ( $W_m/D$ )

Dari grafik hubungan tersebut, dapat diketahui kedalaman *scouring* maksimum ( $S_m$ ) dan lebar *scouring* maksimum ( $W_m$ ) akan meningkat apabila semakin tinggi gelombang yang diberikan. Hal ini berlaku untuk semua kondisi peletakan pipa, baik yang meletak maupun yang *in-trench*. Pada pipa dengan kondisi *in-trench* 3 mm, nilai  $H/gT^2$  pada percobaan kedua lebih kecil dari percobaan pertama. Pada percobaan pertama tidak mengalami *scouring* sama sekali, sedangkan pada percobaan kedua mengalami *scouring*. Meskipun nilai  $H/gT^2$  lebih kecil, tetapi  $H$  pada percobaan kedua lebih besar daripada percobaan pertama. Perlu diingat juga bahwa dalam eksperimen ini, periode gelombang tidak divariasikan. Hanya ada variasi tinggi gelombang dan peletakan saja. Jadi, dapat disimpulkan bahwa untuk semua kondisi peletakan pipa, semakin tinggi gelombang yang diberikan, maka semakin dalam dan lebar *scouring* yang terbentuk di sekitar pipa.

Selain *wave steepness*, juga terdapat parameter tidak berdimensi yang sering digunakan untuk analisa *scouring*, yaitu bilangan KC. Berikut adalah grafik hubungan antara bilangan KC dengan *scouring*.



Gambar 4.54 Grafik hubungan antara bilangan KC dengan *non dimensional scour depth* ( $Sm/D$ )



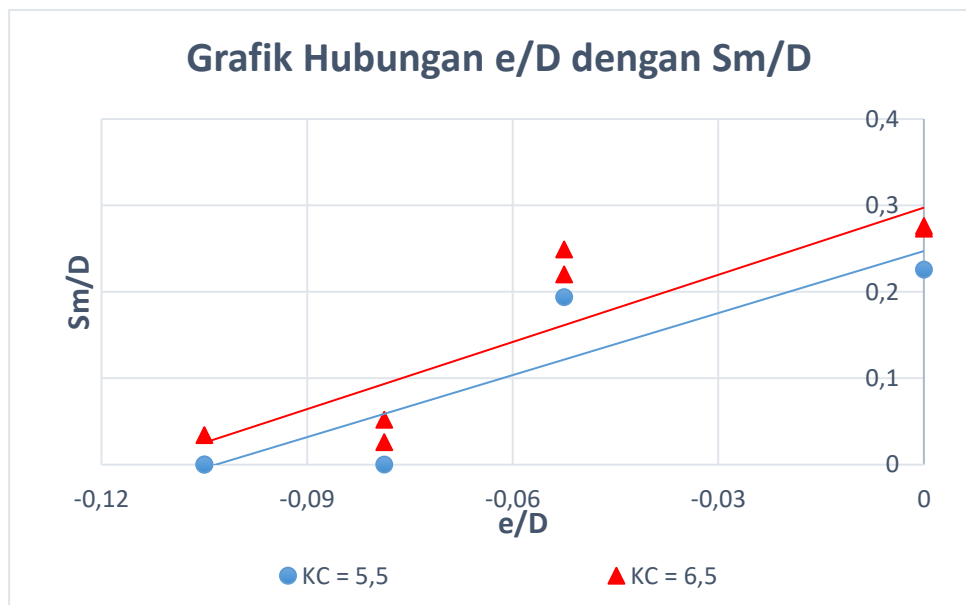
Gambar 4.55 Grafik hubungan antara bilangan KC dengan *non dimensional scour width* ( $Wm/D$ )

Dari grafik hubungan tersebut, dapat diketahui bahwa semakin besar bilangan KC (Keulegan-Carpenter *number*), maka semakin besar pula

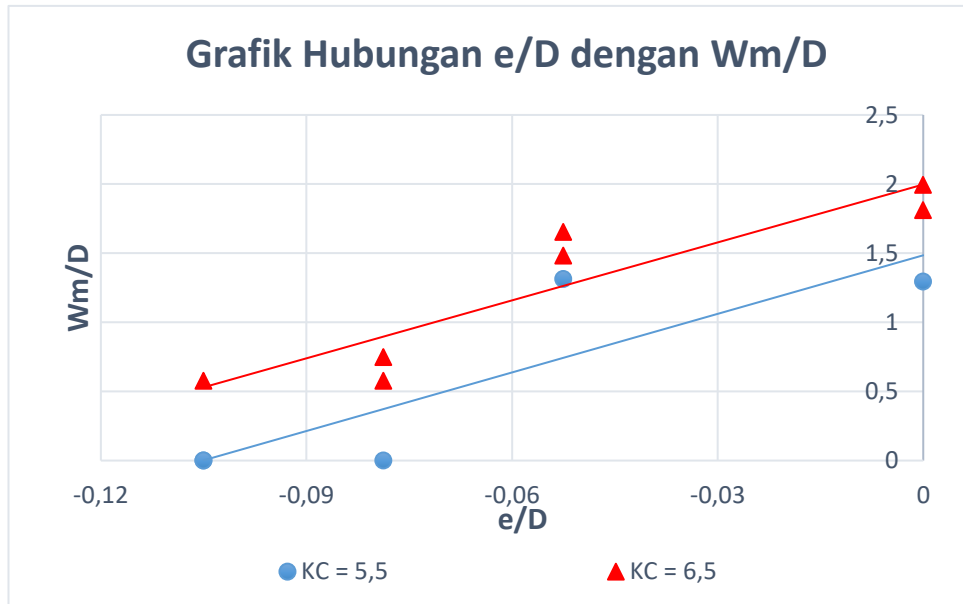


kedalaman dan lebar *scouring* yang terbentuk. Hal ini terlihat pada kedua grafik diatas, apabila menggunakan *trendline linear*, garis menanjak keatas. Hal ini berlaku untuk semua kondisi peletakan pipa, baik yang meletak maupun yang *in-trench*. Pada pipa dengan kondisi *in-trench* 2 mm, nilai KC pada percobaan ketiga lebih kecil dari percobaan kedua. Meskipun nilai KC lebih kecil, tetapi  $U_m$  (kecepatan orbital maksimum) pada percobaan kedua lebih besar daripada percobaan pertama. Perlu diingat juga bahwa dalam eksperimen ini, periode gelombang tidak divariasikan. Hanya ada variasi tinggi gelombang dan peletakan saja. Jadi, apabila T dianggap sama untuk semua percobaan, maka dapat disimpulkan bahwa untuk semua kondisi peletakan pipa, semakin besar bilangan KC pipa, maka semakin dalam dan lebar *scouring* yang terbentuk di sekitar pipa.

Parameter tak berdimensi selanjutnya yang berpengaruh terhadap *scouring* adalah  $e/D$  (*burial depth-diameter ratio*). Parameter ini untuk menjelaskan hubungan antara kedalaman dan lebar *scouring* dengan peletakan pipa. Berikut adalah grafik hubungan antara  $e/D$  dengan *scouring*.



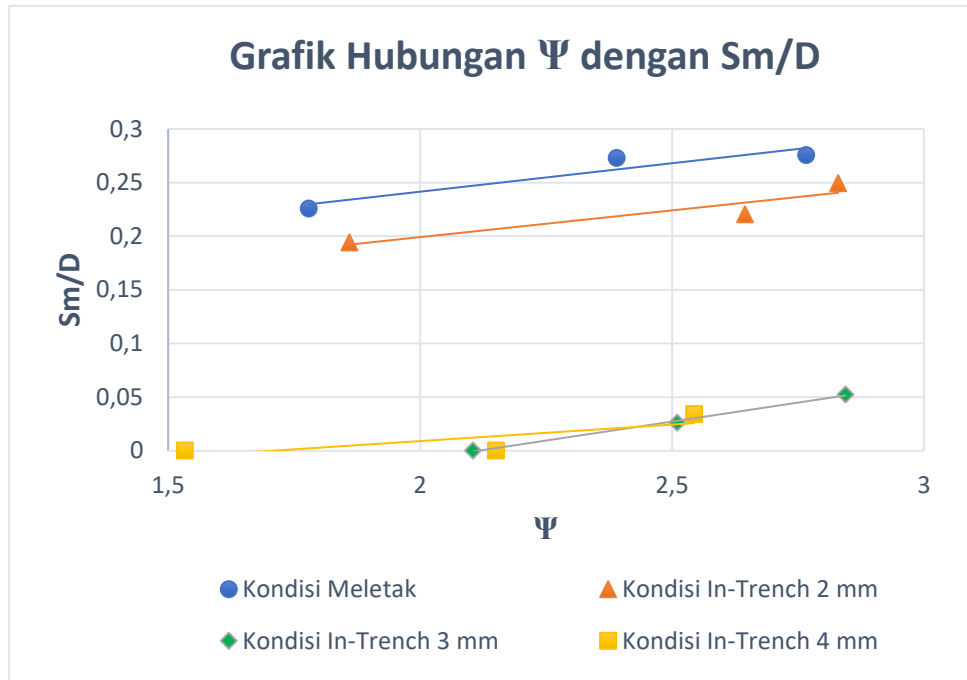
Gambar 4.56 Grafik hubungan antara *buried depth-diameter ratio* ( $e/D$ ) dengan *non dimensional scour depth* ( $Sm/D$ )



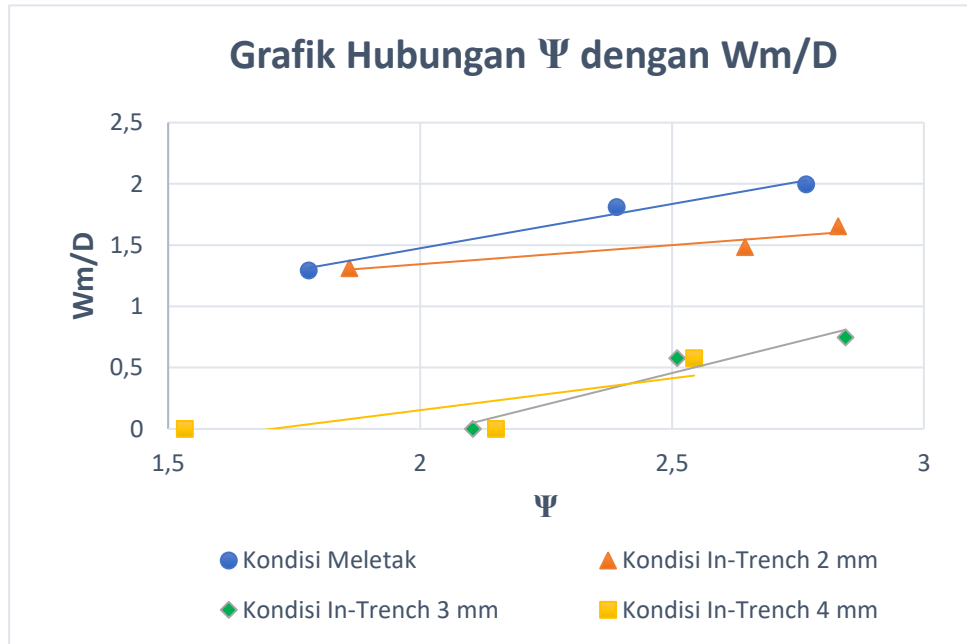
Gambar 4.57 Grafik hubungan antara *buried depth-diameter ratio* ( $e/D$ ) dengan *non dimensional scour width* ( $W_m/D$ )

Dari grafik hubungan tersebut, dapat diketahui bahwa semakin besar  $e/D$ , maka semakin besar pula kedalaman dan lebar *scouring* yang terbentuk. Dalam eksperimen ini, nilai  $e/D$  yang terbesar adalah nol (pipa kondisi meletak) dan sisanya adalah dibawah nol (pipa kondisi *in-trench*) atau negatif. Pada grafik ini, kedalaman dan lebar *scouring* dihubungkan dengan peletakan pipa berdasarkan nilai KC. Berdasarkan perhitungan nilai KC pada tabel 4.6, nilai KC berkisar antara 5-7. Titik segitiga merah merupakan KC yang bernilai 5,5, sedangkan titik bulat berwarna biru merupakan KC yang bernilai 6,5. Dan hasilnya juga sesuai dengan grafik pada gambar 4.47 dan 4.48, yaitu semakin besar nilai KC, maka semakin besar pula kedalaman dan lebar *scouring* yang terbentuk.

Parameter selanjutnya adalah *mobility parameter* ( $\Psi$ ). Parameter ini mendeskripsikan hubungan antara pengaruh karakteristik gelombang terhadap besar butiran sedimen. Perhitungannya sesuai dengan persamaan 2.41. Berikut adalah grafik hubungan antara *mobility parameter* dengan *scouring*.



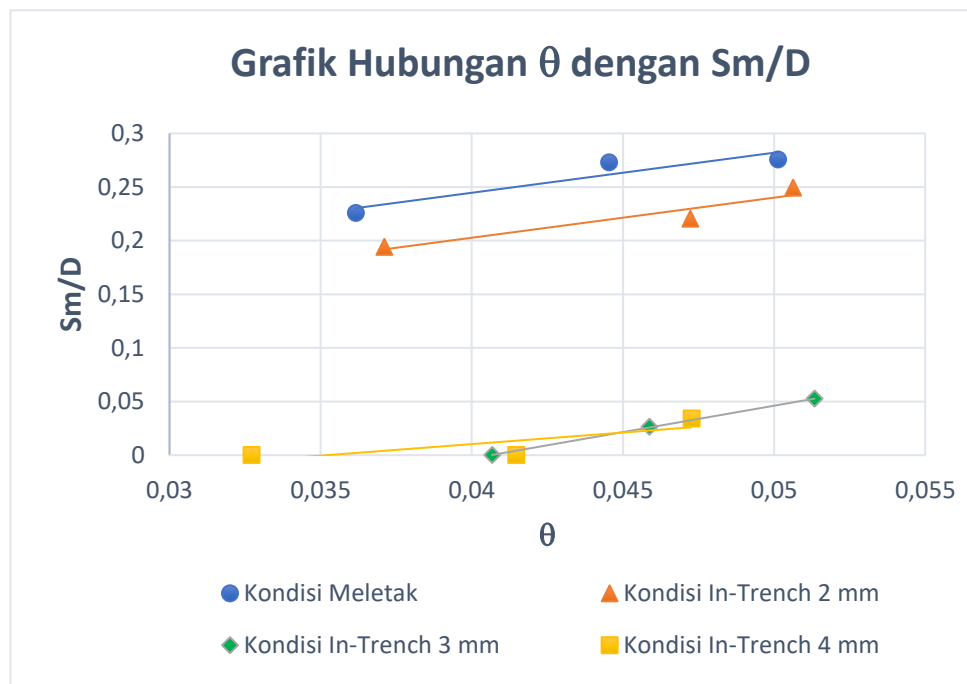
Gambar 4.58 Grafik hubungan antara *mobility parameter* ( $\Psi$ ) dengan *non dimensional scour depth* ( $S_m/D$ )



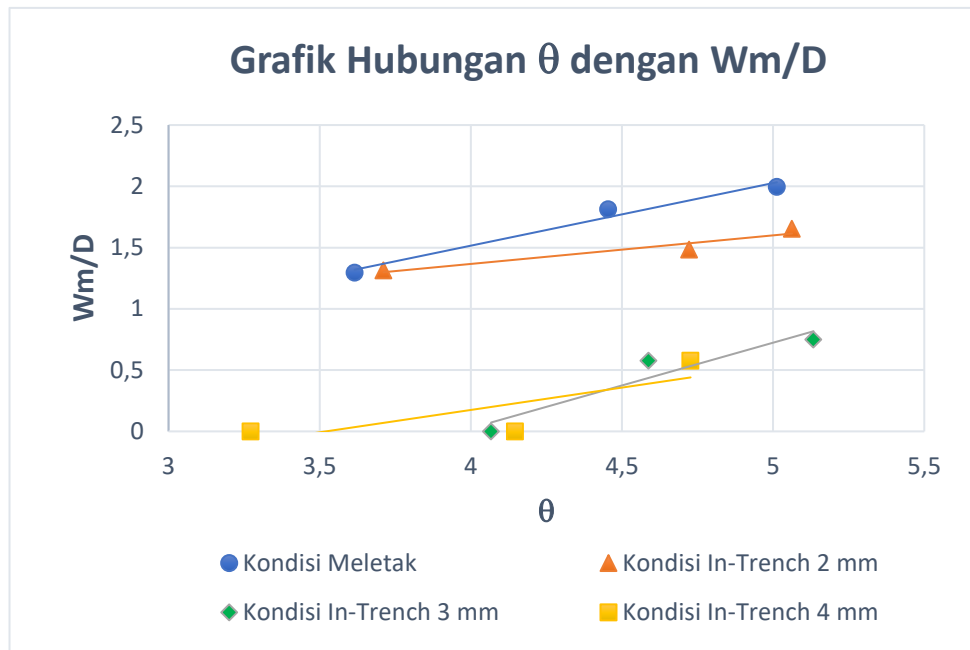
Gambar 4.59 Grafik hubungan antara *mobility parameter* ( $\Psi$ ) dengan *non dimensional scour width* ( $W_m/D$ )

Dari kedua grafik hubungan tersebut, dapat diketahui bahwa semakin besar  $\Psi$ , maka semakin besar pula kedalaman dan lebar *scouring* yang terbentuk. Hal tersebut berlaku untuk semua kondisi, baik yang meletak maupun *in-trench*. Besar *mobility parameter* berbanding terbalik dengan besar butiran sedimen ( $d_{50}$ ). Jadi, apabila semakin besar butiran sedimen yang ada di sekitar struktur pipa, maka semakin kecil kedalaman dan lebar *scouring* yang terbentuk.

Parameter yang terakhir adalah *shield parameter* ( $\theta$ ). Parameter ini mendeskripsikan hubungan antara pengaruh kekasaran sedimen terhadap pergerakan sedimen pada saat *scouring*. Berikut adalah grafik hubungan antara *shield parameter* dengan *scouring*.



Gambar 4.60 Grafik hubungan antara *shield parameter* ( $\theta$ ) dengan *non dimensional scour depth* ( $Sm/D$ )



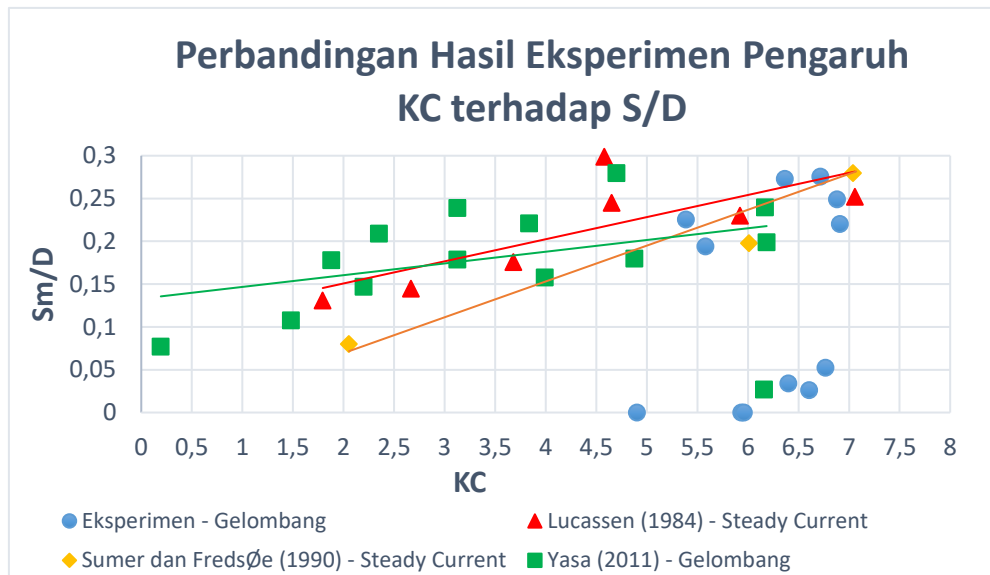
Gambar 4.61 Grafik hubungan antara *shield parameter* ( $\theta$ ) dengan *non dimensional scour width* ( $W_m/D$ )

Dari kedua grafik hubungan tersebut, dapat diketahui bahwa semakin besar  $\theta$ , maka semakin besar pula kedalaman dan lebar *scouring* yang terbentuk. Hal tersebut berlaku untuk semua kondisi, baik yang meletak maupun *in-trench*. Karena ukuran butir tanah ( $d_{50}$ ) yang digunakan adalah sama, maka kekasaran sedimen juga sama. Sehingga, faktor yang mempengaruhi nilai *shield parameter* diatas adalah nilai kecepatan orbital. Jadi, semakin besar nilai kecepatan orbital, maka semakin besar pula kedalaman dan lebar *scouring* yang terbentuk.

#### 4.7 Perbandingan Hasil Eksperimen dengan Penelitian Lain

Beberapa penelitian terkait *scouring* pada pipa telah banyak dilakukan, namun hanya sedikit yang membahas masalah *scouring* pada pipa dengan kondisi *in-trench*. Beberapa penelitian sering membahas tentang pengaruh bilangan KC terhadap *non dimensional scour depth* ( $S/D$ ). Salah satu penelitian tersebut adalah Sumer dan Fredsøe (1990), Lucassen (1984) dan Yasa (2011). Pada penelitian Sumer dan Fredsøe (1990), pipa yang digunakan berukuran 5 cm dan menggunakan arus (*steady current*) untuk eksperimennya. Pada

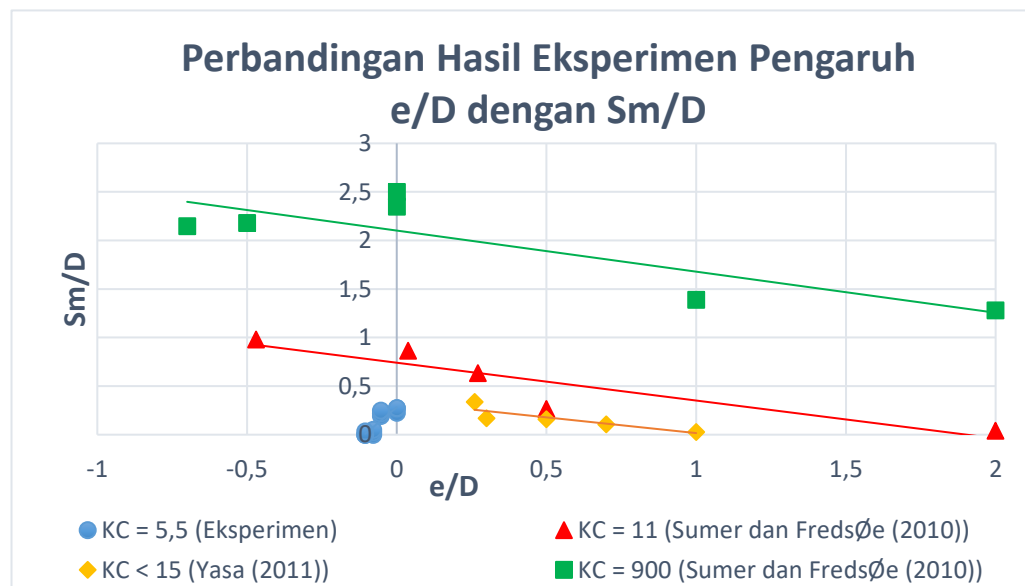
penelitian Lucassen (1984), pipa yang digunakan berukuran 2,5 cm – 7,5 cm dan juga menggunakan arus (*steady current*) untuk eksperimennya. Pada penelitian Yasa (2011), ukuran pipa yang digunakan tidak disebutkan, namun menggunakan gelombang untuk eksperimennya.



Gambar 4.62 Perbandingan hasil eksperimen pengaruh KC terhadap *non dimensional scour depth* ( $S_m/D$ )

Dari grafik tersebut, dapat diketahui bahwa ukuran diameter pipa yang digunakan sangat berpengaruh terhadap *scouring*. Semakin besar ukuran pipa, maka semakin kecil kedalaman dan lebar *scouring* yang terbentuk. Hal ini dikarenakan pada persamaan 2.13, besar ukuran diameter pipa berbanding terbalik terhadap bilangan KC. Pada gambar 4.47 dan 4.48 juga dapat diperoleh kesimpulan bahwa semakin besar bilangan KC, maka semakin besar kedalaman dan lebar *scouring* yang terbentuk. Selain nilai KC, pada eksperimen ini juga terdapat variasi  $e/D$  yang berpengaruh juga terhadap *scouring*. Pada penelitian Sumer dan Fredsøe (1990) dan Lucassen (1984) jenis aliran yang digunakan adalah *steady current*, berbeda dengan eksperimen ini yang menggunakan gelombang ireguler. Jadi, dapat disimpulkan juga bahwa pengaruh arus lebih besar daripada pengaruh gelombang pada pembentukan *scouring*.

Sumer dan Fredsøe telah banyak melakukan penelitian terkait *scouring* pada pipa, salah satunya yang membahas tentang masalah *scouring* akibat pengaruh posisi pipa yang dilakukan pada tahun 1990. Penelitian tersebut sangat erat sekali dengan eksperimen ini, yang salah satu permasalahannya membahas tentang peletakan pipa ( $e/D$ ). Berikut adalah perbandingan hasil eksperimen tugas akhir ini dengan penelitian yang dilakukan oleh Sumer dan Fredsøe.



Gambar 4.63 Perbandingan hasil eksperimen pengaruh  $e/D$  terhadap *non dimensional scour depth* ( $Sm/D$ )

Terdapat perbedaan yang sangat signifikan antara penelitian Sumer dan Fredsøe (1990), Yasa (2011) dengan eksperimen ini. Nilai KC yang dihasilkan pada eksperimen ini berkisar antara 5-7, sedangkan pada penelitian yang dilakukan oleh Sumer dan Fredsøe (1990) terdapat dua nilai KC yang diteliti, yaitu 11 dan 900. Pada penelitian milik Yasa (2011), tidak diketahui rentangan nilai KC, hanya terdapat keterangan bahwa nilai  $KC < 15$ . Nilai KC pada penelitian Sumer dan Fredsøe (1990) tersebut, jauh lebih besar dari eksperimen ini. Selain perbedaan nilai KC, rentang nilai  $e/D$  juga berbeda. Hasil pada grafik tersebut menunjukkan bahwa pada eksperimen ini, *trendline* dari kanan ke kiri menunjukkan terjadinya penurunan, sedangkan pada penelitian Sumer dan Fredsøe (1990) dan Yasa (2011) menunjukkan terjadinya kenaikan.

Dari grafik tersebut, dapat dapat disimpulkan bahwa nilai  $KC$  dan  $e/D$  sangat mempengaruhi terjadi *scouring*. Besar nilai  $KC$  berbanding lurus dengan kedalaman *scouring* yang terbentuk. Apabila  $e/D \geq 0$ , maka semakin besar nilai  $e/D$ , kedalaman *scouring* yang terbentuk akan semakin kecil. Apabila  $e/D \leq 0$ , maka semakin kecil nilai  $e/D$ , kedalaman *scouring* yang terbentuk akan semakin kecil juga. Hal ini terbukti bahwa pada penelitian Sumer dan Fredsøe (1990) pada kasus  $KC = 900$ .



## BAB V

### PENUTUP

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil eksperimen terkait *scouring* pada pipa akibat gelombang ireguler dengan kondisi meletak dan *in-trench*, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut.

1. Pada pipa kondisi meletak ( $e/D = 0$ ), kedalaman *scouring* yang terbentuk ( $S_m/D$ ) berkisar antara  $0 - 0,276$  dengan lebar *scouring* ( $W_m/D$ ) berkisar antara  $0 - 1,995$ . Pada pipa kondisi *in-trench* ( $e/D < 0$ ), kedalaman *scouring* ( $S_m/D$ ) yang terbentuk lebih kecil, yaitu berkisar antara  $0 - 0,249$ . Lebar *scouring* ( $W_m/D$ ) yang terbentuk juga lebih kecil, yaitu berkisar antara  $0 - 1,654$ . Nilai 0 (nol) dikarenakan tidak terjadi *scouring*.
2. Laju propagasi *scouring* pada kondisi meletak ( $e/D = 0$ ) berkisar antara  $0,0015 \text{ m/s} - 0,0029 \text{ m/s}$ . Sedangkan pada kondisi *in-trench* ( $e/D < 0$ ), laju propagasi *scouring* berkisar antara  $0 \text{ m/s} - 0,0035 \text{ m/s}$ . Nilai 0 (nol) dikarenakan tidak terjadi *scouring*.
3. Berdasarkan hasil perbandingan dengan parameter-parameter tak berdimensi, *wave steepness* ( $H/gT^2$ ), *KC number*, *burial depth to diameter ratio* ( $e/D$ ), *mobility parameter* ( $\Psi$ ) dan *shield parameter* ( $\theta$ ) dapat ditarik kesimpulan bahwa :
  - Semakin tinggi gelombang yang mengenai struktur pipa, maka semakin besar pula kedalaman dan lebar *scouring* yang terbentuk.
  - Semakin besar bilangan KC pipa, maka semakin besar pula kedalaman dan lebar *scouring* yang terbentuk.
  - Posisi pipa juga berpengaruh pada hasil *scouring*, apabila  $e/D \leq 0$ , semakin besar nilai  $e/D$ , maka kedalaman dan lebar *scouring* yang terbentuk juga semakin besar. apabila  $e/D \geq 0$ , semakin besar nilai  $e/D$ , maka kedalaman dan lebar *scouring* yang terbentuk juga semakin kecil.

- Selain itu, butiran tanah yang digunakan juga berpengaruh terhadap *scouring*. Semakin besar butiran sedimen yang ada di sekitar struktur pipa, maka semakin kasar permukaan sedimennya, sehingga kedalaman dan lebar *scouring* yang terbentuk semakin kecil.

## 5.2 Saran

Dari eksperimen yang sudah dilakukan, saran penulis apabila melakukan penelitian yang serupa selanjutnya adalah sebagai berikut.

1. Pasir yang digunakan berukuran lebih kecil dari eksperimen ini. Hal ini untuk membuat kekasaran sedimen semakin kecil, sehingga memudahkan pergerakan sedimen. Apabila pergerakan sedimen lebih mudah, maka *scouring* dapat terjadi, sehingga dari semua hasil percobaan dapat menghasilkan nilai kedalaman dan lebar *scouring* untuk memudahkan analisa.
2. Apabila pasir yang digunakan berukuran sama, maka perlu ditambah dengan arus untuk menghasilkan *scouring* yang lebih besar, sehingga dapat mendorong pergerakan sedimen. Tujuannya sama dengan saran yang pertama, yaitu untuk menghasilkan nilai kedalaman dan lebar *scouring* pada semua variasi percobaan.
3. Alat yang digunakan untuk pengukuran *scouring* diganti dengan yang lebih canggih seperti laser meter, sehingga tidak perlu di plot lagi ke AutoCAD. Selain itu, bisa digunakan alat seperti echosounder sehingga dapat diketahui profil 3D *scouring* tersebut.

## DAFTAR PUSTAKA

- Bai, Q., dan Y. Bai. 2014. *Subsea Pipeline Design, Analysis and Installation*. USA : Elsevier.
- Bhattacharyya, R. 1978. *Dynamic of Marine Vehicles*. USA : John Wiley & Sons.
- Breusers, H.N.C., dan A.J. Raudkivi. 1991. *Scouring*. Rotterdam : A.A. Balkema.
- British Petroleum. 2016. *BP Statistical Review of World Energy*. United Kingdom.
- Budiarti, L. 2016. *Pemodelan Numerik Profil 2D Scouring pada Pipa Bawah Laut dengan Variasi Jarak Clearance terhadap Dasar Laut*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan ITS. Surabaya.
- CERC. 1984. *Shore Protection Manual*. Washington : US Army Coastal Engineering Research Center.
- Cheng, L., Z. Zang, dan F. Li. 2014. 3D scour below pipelines under waves and combined waves and currents. *Coastal Engineering Journal* 83 : 137-149.
- Darwis, W. 2014. *Studi Refleksi Gelombang pada Peredam Gelombang Sisi Miring Berpori Secara Eksperimental*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan ITS. Surabaya.
- Etemad-Shahidi, A., R. Yasa, dan M. H. Kazeminezhad. 2010. Prediction of wave-induced scour depth undersubmarine pipelines using machine learning approach. *Applied Ocean Research*.
- Fredsøe, J. dan R. Deigaard. 1992. *Mechanics of Coastal Sediment Transport*. Singapura : World Scientific.
- Gao, F. dan D. Jeng. 2005. *A New Design for Wave-Induced Pipeline Stability on a Sandy Seabed*. Australia : The University of Sydney.
- Güney, M.S., M. Doğan, G. Bombar, A. O. Aksoy. 2011. Experimental Study of Local Scour Submerged Pipe Resulting from Hydrograph. *6<sup>th</sup> International Advanced Technologies Symposium*. Turkey.

- Hansen, E.A., J. Fredsøe, dan Y. Mao. 1986. Two Dimensional Scour Below Pipelines. *Fifth International Symposium on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, ASME 3 : 670-678.
- Herbich, J.B. 1981. *Offshore Pipeline Design Elements*. New York : Marcel Dekker Inc.
- Kjeldsen, S.P., O. Gjorsvik, K.G. Bringaker & J. Jacobsen. 1973. Local Scour Near Offshore Pipelines. *Second International Port and Ocean Engineering under Arctic Condition*, University of Iceland : 308-331.
- Lucassen, R. J. 1984. *Scour Underneath Submarine Pipeline*, Thesis. Delft University of Technology
- Lim, F.H. dan Y.M. Chiew. 1996. Stability of riprap layer under live bed condition. *Proceedings of 1st International Conference on New/Emerging Concepts for River*, RiverTech'96 vol. 2 : 830-837.
- Mao, Y. 1986. *The Interaction between A Pipeline and An Erodible Bed*. Series Paper 39, Tech. Univ. of Denmark, ISVA, in partial fulfillment of the requirement for the degree of Ph. D.
- Mousselli, A.H. 1981. *Offshore Pipeline Design Analysis and Methods*. Oklahoma : Penwell Book.
- Nugraha, M.C. 2012. *Analisa Pengaruh Scouring pada Pipa Bawah Laut (Studi Kasus Pipa Gas Transmisi SSWJ Jalur Pipa Gas Labuhan Maringgai – Muara Bekasi*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan ITS. Surabaya.
- Nugroho, Adi. 2011. *Analisa Scouring Pipa Bawah Laut Kodeco Jalur Poleng-Gresik dengan Variasi Tipe Tanah*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan ITS. Surabaya.
- Pebriantina, Minati. 2016. *Analisa Scouring Pipa Bawah Laut Kondisi In-Trench dan Pengembangan Perangkat Lunak untuk Pemodelan Matematis dengan Variasi Diameter Pipa*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan ITS. Surabaya.

- Soulsby, S. 1997. *A Manual for Practical Applications*. New York : Thomas Telford.
- Sumer, B.M., dan J. Fredsøe. 1990. Scour below pipelines in waves. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE 116 : 307-323.
- Sumer, B.M. dan J. Fredsøe. 1991. Onset of scour below pipeline exposed to waves. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, vol. 1 No. 3 : 189-194.
- Sumer, B.M. dan J. Fredsøe. 1996. Scour around pipelines in combined waves and current. *Proc. 7th International Conference of Off-shore Mechanics and Arctic Engineering Conference*, ASME vol. V : 595-602.
- Sumer, B.M. dan J. Fredsøe. 2002. *The Mechanical of Scour in The Marine Environment*. Denmark : World Scientific.
- Suntoyo. 2016. *Applikasi Pemodelan Turbulent Boundary Layer untuk Pengembangan Model Scouring pada Marine Pipeline di Perairan Indonesia dan Penanggulangannya*. Usulan PUPT ITS. Surabaya.
- Terzaghi, K. dan R.B. Peck. 1948. *Soil Mechanics in Engineering Practice*. New York : John Wiley & Sons.
- Testik, Firat Y. dan D. Morgan Young. 2009. *Onshore Scour Characteristic Around Submerged Vertical and Semicircular Breakwaters*. Coastal Engineering Journal Elsevier. <http://www.elsevier.com/locate/coastaleng>. (Diakses pada tanggal 1 Juli 2017).
- Wirayuhanto, Harish. 2017. *Studi Eksperimen Karakteristik Scouring di Sekitar Artificial Reef Bentuk Heksagonal*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan ITS. Surabaya.
- Yasa, R. 2011. Prediction of the Scour Depth under Submarine Pipelines — in Wave Condition. *Proceedings of the 11th International Coastal Symposium*. Poland : 627 – 630.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## LAMPIRAN A

### HASIL PENGOLAHAN DATA GELOMBANG DENGAN ANAWARE

#### A.1 Hasil Pengolahan Gelombang pada Pipa Kondisi Meletak dengan $H_i = 5$ cm dan $T_i = 1$ s

Wave and Response Analysis - FlumeTank@2011

Beginning of analysis result

```
=====
Nama File: H 5 T 1.xls
=====
```

Channel 1

```
+++++=====+++++=====+++++=====+++++=====+++++
```

Calibration Equation  
 $y = -1.600x + -0.454$   
Correlation Coefficient  
 $R^2 = -0.992$

Basic Output

```
+++++=====+++++=====+++++=====+++++=====+++++
```

Number of Waves	= 2228
Standard Deviation	= 1.975
Variance	= 3.903

Wave Characteristic

```
+++++=====+++++=====+++++=====+++++=====+++++
```

Min-First Moment (momen -1)	= 1.66975
Zeroth Moment	= 4.92904
First Moment	= 15.31053
Second Moment	= 51.11668
Third Moment	= 191.34217
Fourth Moment	= 855.16966

Average Wave Period	= 2.0228 seconds
Wave Peak Period	= 1.5362 seconds
Mean Zero Crossing Period	= 1.9511 seconds
Significant Wave Height	= 8.8806 centimetres
Maximum Wave Height	= 15.7186 centimetres
Zero Moment Wave Height	= 8.8806 centimetres
Average Wave Height	= 5.5504 centimetres
rms Wave Height	= 4.9376 centimetres
Average of Highest 1/10	= 11.2783 centimetres

```

Channel 2
+++++=====+++++=====+++++=====+++++=====+++++

Calibration Equation
y = 2.013x + -0.524
Correlation Coefficient
R^2 = 0.639

Basic Output
+++++=====+++++=====+++++=====+++++=====+++++

Number of Waves           = 2256
Standard Deviation        = 2.520
Variance                  = 6.352

Wave Characteristic
+++++=====+++++=====+++++=====+++++=====+++++

Min-First Moment (momen -1)= 2.55615
Zeroth Moment             = 7.65822
First Moment              = 24.62652
Second Moment             = 88.06594
Third Moment              = 377.54754
Fourth Moment             = 2111.04927

Average Wave Period       = 1.9539 seconds
Wave Peak Period         = 1.2833 seconds
Mean Zero Crossing Period = 1.8528 seconds
Significant Wave Height  = 11.0694 centimetres
Maximum Wave Height      = 19.5928 centimetres
Zero Moment Wave Height   = 11.0694 centimetres
Average Wave Height       = 6.9184 centimetres
rms Wave Height           = 6.1546 centimetres
Average of Highest 1/10   = 14.0581 centimetres

End of analysis result

```

## A.2 Hasil Pengolahan Gelombang pada Pipa Kondisi Meletak dengan $H_i = 6$ cm dan $T_i = 1$ s

Wave and Response Analysis - FlumeTank@2011

Beginning of analysis result

```

=====
Nama File: H 6 T 1.xls
=====

```

Channel 1



+++++=====+++++=====+++++=====+++++=====+++++

Calibration Equation  
y = -1.600x + -0.454  
Correlation Coefficient  
R^2 = -0.992

Basic Output

+++++=====+++++=====+++++=====+++++=====+++++

Number of Waves = 2057  
Standard Deviation = 2.366  
Variance = 5.599

Wave Characteristic

+++++=====+++++=====+++++=====+++++=====+++++

Min-First Moment (momen -1) = 2.35410  
Zeroth Moment = 6.48445  
First Moment = 18.94874  
Second Moment = 60.22394  
Third Moment = 218.48693  
Fourth Moment = 969.99311

Average Wave Period = 2.1502 seconds  
Wave Peak Period = 1.5656 seconds  
Mean Zero Crossing Period = 2.0617 seconds  
Significant Wave Height = 10.1858 centimetres  
Maximum Wave Height = 18.0289 centimetres  
Zero Moment Wave Height = 10.1858 centimetres  
Average Wave Height = 6.3661 centimetres  
rms Wave Height = 5.6633 centimetres  
Average of Highest 1/10 = 12.9360 centimetres

Channel 2

+++++=====+++++=====+++++=====+++++=====+++++

Calibration Equation  
y = 2.013x + -0.524  
Correlation Coefficient  
R^2 = 0.639

Basic Output

+++++=====+++++=====+++++=====+++++=====+++++

Number of Waves = 2076  
Standard Deviation = 2.961  
Variance = 8.765

Wave Characteristic

+++++=====+++++=====+++++=====+++++=====+++++

Min-First Moment (momen -1) = 3.52316  
Zeroth Moment = 9.78497

First Moment	= 29.55468
Second Moment	= 100.84795
Third Moment	= 420.56291
Fourth Moment	= 2329.29992
Average Wave Period	= 2.0802 seconds
Wave Peak Period	= 1.3074 seconds
Mean Zero Crossing Period	= 1.9572 seconds
Significant Wave Height	= 12.5124 centimetres
Maximum Wave Height	= 22.1469 centimetres
Zero Moment Wave Height	= 12.5124 centimetres
Average Wave Height	= 7.8202 centimetres
rms Wave Height	= 6.9569 centimetres
Average of Highest 1/10	= 15.8907 centimetres
End of analysis result	

### A.3 Hasil Pengolahan Gelombang pada Pipa Kondisi Meletak dengan $H_i = 7$ cm dan $T_i = 1$ s

Wave and Response Analysis - FlumeTank@2011

Beginning of analysis result

```
=====
Nama File: H 7 T 1.xls
=====
```

Channel 1

```
+++++=====+++++=====+++++=====+++++=====+++++
```

Calibration Equation  
 $y = -1.600x + -0.454$   
 Correlation Coefficient  
 $R^2 = -0.992$

Basic Output

```
+++++=====+++++=====+++++=====+++++=====+++++
```

Number of Waves	= 2175
Standard Deviation	= 2.482
Variance	= 6.162

Wave Characteristic

```
+++++=====+++++=====+++++=====+++++=====+++++
```

Min-First Moment (momen -1)	= 2.64744
Zeroth Moment	= 7.66285
First Moment	= 23.34685
Second Moment	= 76.62568
Third Moment	= 284.16732
Fourth Moment	= 1279.60355

Average Wave Period	= 2.0623 seconds
Wave Peak Period	= 1.5376 seconds
Mean Zero Crossing Period	= 1.9870 seconds
Significant Wave Height	= 11.0727 centimetres
Maximum Wave Height	= 19.5987 centimetres
Zero Moment Wave Height	= 11.0727 centimetres
Average Wave Height	= 6.9205 centimetres
rms Wave Height	= 6.1564 centimetres
Average of Highest 1/10	= 14.0624 centimetres

Channel 2

```
+++++=====+++++=====+++++=====+++++=====+++++
```

Calibration Equation  
 $y = 2.013x + -0.524$   
 Correlation Coefficient

R^2 = 0.639

Basic Output

+++++

Number of Waves = 2187  
Standard Deviation = 3.126  
Variance = 9.772

Wave Characteristic

+++++

Min-First Moment (momen -1) = 4.06118  
Zeroth Moment = 11.86031  
First Moment = 37.18619  
Second Moment = 129.57287  
Third Moment = 539.54094  
Fourth Moment = 2917.61440

Average Wave Period = 2.0040 seconds  
Wave Peak Period = 1.3241 seconds  
Mean Zero Crossing Period = 1.9010 seconds  
Significant Wave Height = 13.7755 centimetres  
Maximum Wave Height = 24.3827 centimetres  
Zero Moment Wave Height = 13.7755 centimetres  
Average Wave Height = 8.6097 centimetres  
rms Wave Height = 7.6592 centimetres  
Average of Highest 1/10 = 17.4949 centimetres

End of analysis result

#### A.4 Hasil Pengolahan Gelombang pada Pipa Kondisi *In-Trench* 2 mm dengan $H_i = 5$ cm dan $T_i = 1$ s

Wave and Response Analysis - FlumeTank@2011

Beginning of analysis result

=====

Nama File: H 5 T 1.xls

=====

Channel 1

+++++=====+++++=====+++++=====+++++

Calibration Equation

y = -1.600x + -0.454  
Correlation Coefficient  
R^2 = -0.992

Basic Output

+++++

Number of Waves = 2242  
Standard Deviation = 1.983  
Variance = 3.931

Wave Characteristic

+++++

Min-First Moment (momen -1) = 1.71764  
Zeroth Moment = 5.06821  
First Moment = 15.70478  
Second Moment = 52.12156  
Third Moment = 192.92527  
Fourth Moment = 849.16547

Average Wave Period = 2.0277 seconds  
Wave Peak Period = 1.5567 seconds  
Mean Zero Crossing Period = 1.9593 seconds  
Significant Wave Height = 9.0051 centimetres  
Maximum Wave Height = 15.9390 centimetres  
Zero Moment Wave Height = 9.0051 centimetres  
Average Wave Height = 5.6282 centimetres  
rms Wave Height = 5.0068 centimetres  
Average of Highest 1/10 = 11.4364 centimetres

Channel 2

+++++=====+++++=====+++++=====+++++

Calibration Equation  
y = 2.013x + -0.524  
Correlation Coefficient  
R^2 = 0.639

Basic Output

+++++

Number of Waves = 2251  
Standard Deviation = 2.577  
Variance = 6.643

Wave Characteristic

+++++

Min-First Moment (momen -1) = 2.73563  
Zeroth Moment = 8.15219  
First Moment = 26.06630  
Second Moment = 92.68489  
Third Moment = 394.91946

```

Fourth Moment                = 2194.37988

Average Wave Period          = 1.9651 seconds
Wave Peak Period             = 1.2913 seconds
Mean Zero Crossing Period    = 1.8634 seconds
Significant Wave Height      = 11.4208 centimetres
Maximum Wave Height          = 20.2148 centimetres
Zero Moment Wave Height      = 11.4208 centimetres
Average Wave Height          = 7.1380 centimetres
rms Wave Height              = 6.3500 centimetres
Average of Highest 1/10      = 14.5044 centimetres

End of analysis result

```

## A.5 Hasil Pengolahan Gelombang pada Pipa Kondisi *In-Trench* 2 mm dengan $H_i = 6$ cm dan $T_i = 1$ s

Wave and Response Analysis - FlumeTank@2011

Beginning of analysis result

```

=====
Nama File: H 6 T 1.xls
=====

```

Channel 1

```

+++++=====+++++=====+++++=====+++++

```

```

Calibration Equation
y = -1.600x + -0.454
Correlation Coefficient
R^2 = -0.992

```

Basic Output

```

+++++

```

```

Number of Waves      = 2060
Standard Deviation    = 2.398
Variance              = 5.752

```

Wave Characteristic

```

+++++

```

```

Min-First Moment (momen -1)= 2.53277
Zeroth Moment           = 6.91268
First Moment            = 19.92974
Second Moment           = 62.05054
Third Moment            = 218.13423
Fourth Moment           = 928.08687

```

Average Wave Period = 2.1793 seconds  
 Wave Peak Period = 1.6246 seconds  
 Mean Zero Crossing Period = 2.0972 seconds  
 Significant Wave Height = 10.5168 centimetres  
 Maximum Wave Height = 18.6147 centimetres  
 Zero Moment Wave Height = 10.5168 centimetres  
 Average Wave Height = 6.5730 centimetres  
 rms Wave Height = 5.8473 centimetres  
 Average of Highest 1/10 = 13.3563 centimetres

Channel 2

+++++=====+++++=====+++++=====+++++=====+++++

Calibration Equation  
 $y = 2.013x + -0.524$   
 Correlation Coefficient  
 $R^2 = 0.639$

Basic Output

+++++=====+++++=====+++++=====+++++=====+++++

Number of Waves = 2074  
 Standard Deviation = 3.036  
 Variance = 9.216

Wave Characteristic

+++++=====+++++=====+++++=====+++++=====+++++

Min-First Moment (momen -1) = 3.86945  
 Zeroth Moment = 10.66577  
 First Moment = 31.94388  
 Second Moment = 108.44841  
 Third Moment = 453.08355  
 Fourth Moment = 2528.44812

Average Wave Period = 2.0979 seconds  
 Wave Peak Period = 1.3013 seconds  
 Mean Zero Crossing Period = 1.9704 seconds  
 Significant Wave Height = 13.0634 centimetres  
 Maximum Wave Height = 23.1222 centimetres  
 Zero Moment Wave Height = 13.0634 centimetres  
 Average Wave Height = 8.1646 centimetres  
 rms Wave Height = 7.2632 centimetres  
 Average of Highest 1/10 = 16.5905 centimetres

End of analysis result

## **A.6 Hasil Pengolahan Gelombang pada Pipa Kondisi *In-Trench* 2 mm dengan $H_i = 7$ cm dan $T_i = 1$ s**

## Wave and Response Analysis - FlumeTank@2011

Beginning of analysis result

=====

Nama File: H 7 T 1.xls

=====

Channel 1

+++++=====+++++=====+++++=====+++++=====+++++

Calibration Equation

y = -1.600x + -0.454

Correlation Coefficient

R^2 = -0.992

Basic Output

+++++=====+++++=====+++++=====+++++=====+++++

Number of Waves = 2168

Standard Deviation = 2.490

Variance = 6.199

Wave Characteristic

+++++=====+++++=====+++++=====+++++=====+++++

Min-First Moment (momen -1)= 2.68151

Zeroth Moment = 7.72967

First Moment = 23.43098

Second Moment = 76.30434

Third Moment = 279.53016

Fourth Moment = 1238.69221

Average Wave Period = 2.0728 seconds

Wave Peak Period = 1.5595 seconds

Mean Zero Crossing Period = 1.9998 seconds

Significant Wave Height = 11.1209 centimetres

Maximum Wave Height = 19.6840 centimetres

Zero Moment Wave Height = 11.1209 centimetres

Average Wave Height = 6.9506 centimetres

rms Wave Height = 6.1832 centimetres

Average of Highest 1/10 = 14.1236 centimetres

Channel 2

+++++=====+++++=====+++++=====+++++=====+++++

Calibration Equation

y = 2.013x + -0.524

Correlation Coefficient

R^2 = 0.639

Basic Output

+++++=====+++++=====+++++=====+++++=====+++++

Number of Waves = 2168



Standard Deviation = 3.176  
Variance = 10.090

#### Wave Characteristic

+++++

Min-First Moment (momen -1) = 4.16075  
Zeroth Moment = 12.05412  
First Moment = 37.55307  
Second Moment = 130.17104  
Third Moment = 541.03324  
Fourth Moment = 2941.25948

Average Wave Period = 2.0168 seconds  
Wave Peak Period = 1.3218 seconds  
Mean Zero Crossing Period = 1.9120 seconds  
Significant Wave Height = 13.8876 centimetres  
Maximum Wave Height = 24.5811 centimetres  
Zero Moment Wave Height = 13.8876 centimetres  
Average Wave Height = 8.6798 centimetres  
rms Wave Height = 7.7215 centimetres  
Average of Highest 1/10 = 17.6373 centimetres

End of analysis result

### A.7 Hasil Pengolahan Gelombang pada Pipa Kondisi *In-Trench* 3 mm dengan $H_i = 5$ cm dan $T_i = 1$ s

Wave and Response Analysis - FlumeTank@2011

Beginning of analysis result

=====  
Nama File: H 5 T 1.xls  
=====

Channel 1

+++++=====+++++=====+++++=====+++++=====+++++

Calibration Equation  
 $y = -1.600x + -0.454$   
Correlation Coefficient  
 $R^2 = -0.992$

Basic Output

+++++=====+++++=====+++++=====+++++=====+++++

Number of Waves = 2204  
Standard Deviation = 2.109  
Variance = 4.447

#### Wave Characteristic

+++++

Min-First Moment (momen -1) = 1.95963  
Zeroth Moment = 5.74346  
First Moment = 17.66402  
Second Moment = 58.16322  
Third Moment = 214.01786  
Fourth Moment = 942.57384

Average Wave Period = 2.0430 seconds  
Wave Peak Period = 1.5608 seconds  
Mean Zero Crossing Period = 1.9744 seconds  
Significant Wave Height = 9.5862 centimetres  
Maximum Wave Height = 16.9676 centimetres  
Zero Moment Wave Height = 9.5862 centimetres  
Average Wave Height = 5.9914 centimetres  
rms Wave Height = 5.3299 centimetres  
Average of Highest 1/10 = 12.1745 centimetres

#### Channel 2

+++++=====+++++=====+++++=====+++++=====+++++

Calibration Equation  
 $y = 2.013x + -0.524$   
Correlation Coefficient  
 $R^2 = 0.639$

#### Basic Output

+++++

Number of Waves = 2235  
Standard Deviation = 2.716  
Variance = 7.379

#### Wave Characteristic

+++++

Min-First Moment (momen -1) = 3.04940  
Zeroth Moment = 9.02326  
First Moment = 28.67946  
Second Moment = 101.52361  
Third Moment = 431.65942  
Fourth Moment = 2398.10587

Average Wave Period = 1.9768 seconds  
Wave Peak Period = 1.2928 seconds  
Mean Zero Crossing Period = 1.8732 seconds  
Significant Wave Height = 12.0155 centimetres  
Maximum Wave Height = 21.2674 centimetres  
Zero Moment Wave Height = 12.0155 centimetres  
Average Wave Height = 7.5097 centimetres  
rms Wave Height = 6.6806 centimetres  
Average of Highest 1/10 = 15.2597 centimetres

End of analysis result

### A.8 Hasil Pengolahan Gelombang pada Pipa Kondisi *In-Trench* 3 mm dengan $H_i = 6$ cm dan $T_i = 1$ s

Wave and Response Analysis - FlumeTank@2011

Beginning of analysis result

```
=====
Nama File: H 6 T 1.xls
=====
```

Channel 1

+++++=====+++++=====+++++=====+++++=====+++++

Calibration Equation  
 $y = -1.600x + -0.454$   
Correlation Coefficient  
 $R^2 = -0.992$

Basic Output

+++++=====+++++=====+++++=====+++++=====+++++

Number of Waves	=	2071
Standard Deviation	=	2.374
Variance	=	5.634

Wave Characteristic

+++++=====+++++=====+++++=====+++++=====+++++

Min-First Moment (momen -1)	=	2.44324
Zeroth Moment	=	6.71123
First Moment	=	19.52461
Second Moment	=	61.64599
Third Moment	=	221.40420
Fourth Moment	=	968.32502

Average Wave Period	=	2.1597 seconds
Wave Peak Period	=	1.5853 seconds
Mean Zero Crossing Period	=	2.0731 seconds
Significant Wave Height	=	10.3624 centimetres
Maximum Wave Height	=	18.3415 centimetres
Zero Moment Wave Height	=	10.3624 centimetres
Average Wave Height	=	6.4765 centimetres
rms Wave Height	=	5.7615 centimetres
Average of Highest 1/10	=	13.1603 centimetres

Channel 2

+++++=====+++++=====+++++=====+++++=====+++++

Calibration Equation  
 $y = 2.013x + -0.524$   
 Correlation Coefficient  
 $R^2 = 0.639$

Basic Output

+++++

Number of Waves = 2071  
 Standard Deviation = 3.037  
 Variance = 9.225

Wave Characteristic

+++++

Min-First Moment (momen -1) = 3.81063  
 Zeroth Moment = 10.49164  
 First Moment = 31.35859  
 Second Moment = 106.12067  
 Third Moment = 440.84783  
 Fourth Moment = 2440.30928

Average Wave Period = 2.1022 seconds  
 Wave Peak Period = 1.3103 seconds  
 Mean Zero Crossing Period = 1.9756 seconds  
 Significant Wave Height = 12.9563 centimetres  
 Maximum Wave Height = 22.9327 centimetres  
 Zero Moment Wave Height = 12.9563 centimetres  
 Average Wave Height = 8.0977 centimetres  
 rms Wave Height = 7.2037 centimetres  
 Average of Highest 1/10 = 16.4545 centimetres

End of analysis result

## A.9 Hasil Pengolahan Gelombang pada Pipa Kondisi *In-Trench* 3 mm dengan $H_i = 7$ cm dan $T_i = 1$ s

Wave and Response Analysis - FlumeTank@2011

Beginning of analysis result

=====

Nama File: H 7 T 1.xls

=====

Channel 1

+++++=====+++++=====+++++=====+++++

Calibration Equation

$y = -1.600x + -0.454$   
 Correlation Coefficient  
 $R^2 = -0.992$

#### Basic Output

+++++

Number of Waves = 2176  
 Standard Deviation = 2.506  
 Variance = 6.280

#### Wave Characteristic

+++++

Min-First Moment (momen -1) = 2.74796  
 Zeroth Moment = 7.95940  
 First Moment = 24.28124  
 Second Moment = 79.84678  
 Third Moment = 297.02035  
 Fourth Moment = 1342.47375

Average Wave Period = 2.0596 seconds  
 Wave Peak Period = 1.5323 seconds  
 Mean Zero Crossing Period = 1.9838 seconds  
 Significant Wave Height = 11.2850 centimetres  
 Maximum Wave Height = 19.9744 centimetres  
 Zero Moment Wave Height = 11.2850 centimetres  
 Average Wave Height = 7.0531 centimetres  
 rms Wave Height = 6.2744 centimetres  
 Average of Highest 1/10 = 14.3319 centimetres

#### Channel 2

+++++=====+++++=====+++++=====+++++

Calibration Equation  
 $y = 2.013x + -0.524$   
 Correlation Coefficient  
 $R^2 = 0.639$

#### Basic Output

+++++

Number of Waves = 2179  
 Standard Deviation = 3.131  
 Variance = 9.803

#### Wave Characteristic

+++++

Min-First Moment (momen -1) = 4.12016  
 Zeroth Moment = 11.97992  
 First Moment = 37.48649  
 Second Moment = 130.62785  
 Third Moment = 546.18412

```

Fourth Moment                = 2980.93242

Average Wave Period          = 2.0080 seconds
Wave Peak Period             = 1.3153 seconds
Mean Zero Crossing Period    = 1.9028 seconds
Significant Wave Height      = 13.8448 centimetres
Maximum Wave Height          = 24.5053 centimetres
Zero Moment Wave Height      = 13.8448 centimetres
Average Wave Height          = 8.6530 centimetres
rms Wave Height              = 7.6977 centimetres
Average of Highest 1/10      = 17.5829 centimetres

End of analysis result

```

## **A.10 Hasil Pengolahan Gelombang pada Pipa Kondisi *In-Trench* 4 mm dengan $H_i = 5$ cm dan $T_i = 1$ s**

Wave and Response Analysis - FlumeTank@2011

Beginning of analysis result

```

=====
Nama File: H 5 T 1.xls
=====

```

Channel 1

```

+++++=====+++++=====+++++=====+++++

```

```

Calibration Equation
y = -1.600x + -0.454
Correlation Coefficient
R^2 = -0.992

```

Basic Output

```

+++++

```

```

Number of Waves      = 2180
Standard Deviation    = 2.016
Variance              = 4.064

```

Wave Characteristic

```

+++++

```

```

Min-First Moment (momen -1)= 1.47546
Zeroth Moment           = 4.36284
First Moment            = 13.65092
Second Moment           = 46.14575
Third Moment            = 175.56338
Fourth Moment           = 798.37365

```

Average Wave Period = 2.0081 seconds  
 Wave Peak Period = 1.5106 seconds  
 Mean Zero Crossing Period = 1.9320 seconds  
 Significant Wave Height = 8.3550 centimetres  
 Maximum Wave Height = 14.7883 centimetres  
 Zero Moment Wave Height = 8.3550 centimetres  
 Average Wave Height = 5.2219 centimetres  
 rms Wave Height = 4.6454 centimetres  
 Average of Highest 1/10 = 10.6108 centimetres

Channel 2

+++++=====+++++=====+++++=====+++++=====+++++

Calibration Equation  
 $y = 2.013x + -0.524$   
 Correlation Coefficient  
 $R^2 = 0.639$

Basic Output

+++++=====+++++=====+++++=====+++++=====+++++

Number of Waves = 2180  
 Standard Deviation = 2.605  
 Variance = 6.785

Wave Characteristic

+++++=====+++++=====+++++=====+++++=====+++++

Min-First Moment (momen -1) = 2.32851  
 Zeroth Moment = 6.95963  
 First Moment = 22.57455  
 Second Moment = 82.23550  
 Third Moment = 360.98909  
 Fourth Moment = 2055.06276

Average Wave Period = 1.9371 seconds  
 Wave Peak Period = 1.2569 seconds  
 Mean Zero Crossing Period = 1.8279 seconds  
 Significant Wave Height = 10.5524 centimetres  
 Maximum Wave Height = 18.6778 centimetres  
 Zero Moment Wave Height = 10.5524 centimetres  
 Average Wave Height = 6.5953 centimetres  
 rms Wave Height = 5.8672 centimetres  
 Average of Highest 1/10 = 13.4016 centimetres

End of analysis result

# **A.11 Hasil Pengolahan Gelombang pada Pipa Kondisi *In-Trench* 4 mm dengan $H_i = 6$ cm dan $T_i = 1$ s**

## Wave and Response Analysis - FlumeTank@2011

Beginning of analysis result

=====  
Nama File: H 6 T 1.xls  
=====

Channel 1

+++++=====+++++=====+++++=====+++++=====+++++

Calibration Equation

y = -1.600x + -0.454

Correlation Coefficient

R^2 = -0.992

Basic Output

+++++=====+++++=====+++++=====+++++=====+++++

Number of Waves = 2178

Standard Deviation = 2.376

Variance = 5.644

Wave Characteristic

+++++=====+++++=====+++++=====+++++=====+++++

Min-First Moment (momen -1)= 2.17336

Zeroth Moment = 5.91005

First Moment = 17.12484

Second Moment = 54.37232

Third Moment = 198.88021

Fourth Moment = 894.78822

Average Wave Period = 2.1684 seconds

Wave Peak Period = 1.5488 seconds

Mean Zero Crossing Period = 2.0715 seconds

Significant Wave Height = 9.7242 centimetres

Maximum Wave Height = 17.2119 centimetres

Zero Moment Wave Height = 9.7242 centimetres

Average Wave Height = 6.0776 centimetres

rms Wave Height = 5.4067 centimetres

Average of Highest 1/10 = 12.3498 centimetres

Channel 2

+++++=====+++++=====+++++=====+++++=====+++++

Calibration Equation

y = 2.013x + -0.524

Correlation Coefficient

R^2 = 0.639

Basic Output

+++++=====+++++=====+++++=====+++++=====+++++

Number of Waves = 2178



Standard Deviation = 3.038  
Variance = 9.228

#### Wave Characteristic

+++++

Min-First Moment (momen -1) = 3.42447  
Zeroth Moment = 9.31922  
First Moment = 27.75515  
Second Moment = 94.70737  
Third Moment = 401.28966  
Fourth Moment = 2266.85888

Average Wave Period = 2.1097 seconds  
Wave Peak Period = 1.2843 seconds  
Mean Zero Crossing Period = 1.9710 seconds  
Significant Wave Height = 12.2110 centimetres  
Maximum Wave Height = 21.6134 centimetres  
Zero Moment Wave Height = 12.2110 centimetres  
Average Wave Height = 7.6319 centimetres  
rms Wave Height = 6.7893 centimetres  
Average of Highest 1/10 = 15.5079 centimetres

End of analysis result

### A.12 Hasil Pengolahan Gelombang pada Pipa Kondisi *In-Trench* 4 mm dengan $H_i = 7$ cm dan $T_i = 1$ s

Wave and Response Analysis - FlumeTank@2011

Beginning of analysis result

=====  
Nama File: H 7 T 1.xls  
=====

Channel 1

+++++=====+++++=====+++++=====+++++

Calibration Equation  
 $y = -1.600x + -0.454$   
Correlation Coefficient  
 $R^2 = -0.992$

Basic Output

+++++=====+++++=====+++++=====+++++

Number of Waves = 2177  
Standard Deviation = 2.569  
Variance = 6.602

#### Wave Characteristic

+++++

Min-First Moment (momen -1) = 2.46984  
Zeroth Moment = 7.09874  
First Moment = 21.57087  
Second Moment = 70.91448  
Third Moment = 264.22380  
Fourth Moment = 1194.09995

Average Wave Period = 2.0677 seconds  
Wave Peak Period = 1.5312 seconds  
Mean Zero Crossing Period = 1.9879 seconds  
Significant Wave Height = 10.6574 centimetres  
Maximum Wave Height = 18.8636 centimetres  
Zero Moment Wave Height = 10.6574 centimetres  
Average Wave Height = 6.6609 centimetres  
rms Wave Height = 5.9255 centimetres  
Average of Highest 1/10 = 13.5349 centimetres

#### Channel 2

+++++

Calibration Equation  
 $y = 2.013x + -0.524$   
Correlation Coefficient  
 $R^2 = 0.639$

#### Basic Output

+++++

Number of Waves = 2177  
Standard Deviation = 3.253  
Variance = 10.585

#### Wave Characteristic

+++++

Min-First Moment (momen -1) = 3.80579  
Zeroth Moment = 11.01576  
First Moment = 34.59715  
Second Moment = 122.16176  
Third Moment = 521.74027  
Fourth Moment = 2905.72003

Average Wave Period = 2.0006 seconds  
Wave Peak Period = 1.2883 seconds  
Mean Zero Crossing Period = 1.8868 seconds  
Significant Wave Height = 13.2760 centimetres  
Maximum Wave Height = 23.4985 centimetres  
Zero Moment Wave Height = 13.2760 centimetres  
Average Wave Height = 8.2975 centimetres  
rms Wave Height = 7.3815 centimetres

Average of Highest 1/10 = 16.8605 centimetres

End of analysis result

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## LAMPIRAN B

### FOTO HASIL PENGAMATAN *SCOURING* TIAP 5 MENIT

#### B.1 Pipa Kondisi Meletak dengan $H_{avg} = 5,55$ cm dan $T_{avg} = 2,02$ s



(a)



(b)

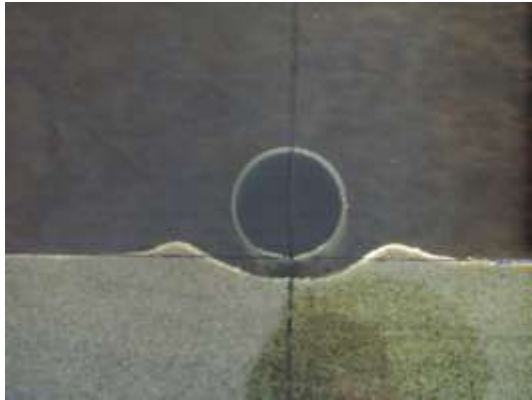


(c)



(d)

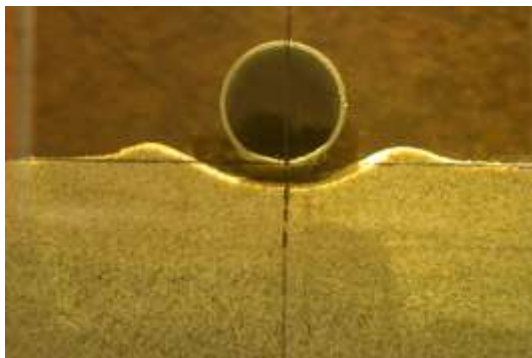
Gambar 1. Pengamatan *scouring* pipa kondisi meletak dengan  $H_{avg} = 5,55$  cm dan  $T_{avg} = 2,02$  s, (a)  $t = 0$  menit, (b)  $t = 5$  menit, (c)  $t = 10$  menit, (d)  $t = 15$  menit



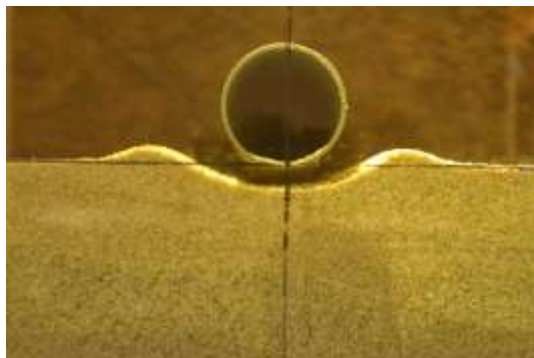
(a)



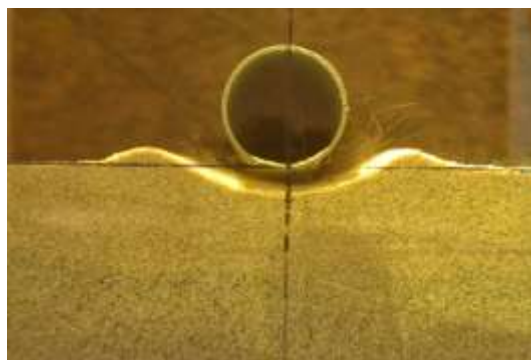
(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar 2. Pengamatan *scouring* pipa kondisi meletak dengan  $H_{avg} = 5,55$  cm dan  $T_{avg} = 2,02$  s, (a)  $t = 20$  menit, (b)  $t = 25$  menit, (c)  $t = 30$  menit, (d)  $t = 35$  menit, (e)  $t = 40$  menit

## B.2 Pipa Kondisi Meletak dengan $H_{avg} = 6,37$ cm dan $T_{avg} = 2,15$ s



(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 3. Pengamatan *scouring* pipa kondisi meletak dengan  $H_{avg} = 6,37$  cm dan  $T_{avg} = 2,15$  s, (a)  $t = 0$  menit, (b)  $t = 5$  menit, (c)  $t = 10$  menit, (d)  $t = 15$  menit



(a)



(b)



(c)



(d)

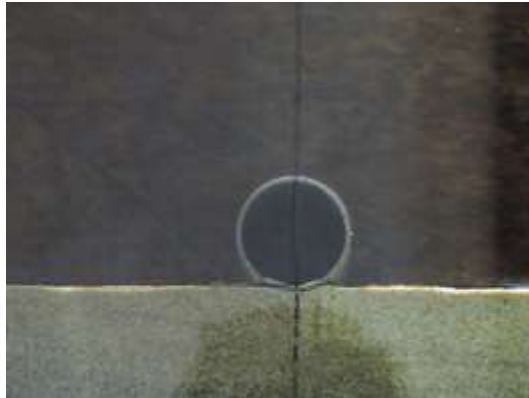


(e)

Gambar 4. Pengamatan *scouring* pipa kondisi meletak dengan  $H_{avg} = 6,37$  cm dan  $T_{avg} = 2,15$  s, (a)  $t = 20$  menit, (b)  $t = 25$  menit, (c)  $t = 30$  menit, (d)  $t = 35$  menit, (e)  $t = 40$  menit



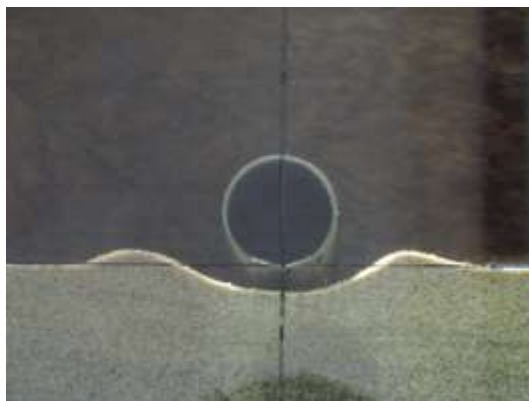
### B.3 Pipa Kondisi Meletak dengan $H_{avg} = 6,92$ cm dan $T_{avg} = 2,06$ s



(a)



(b)

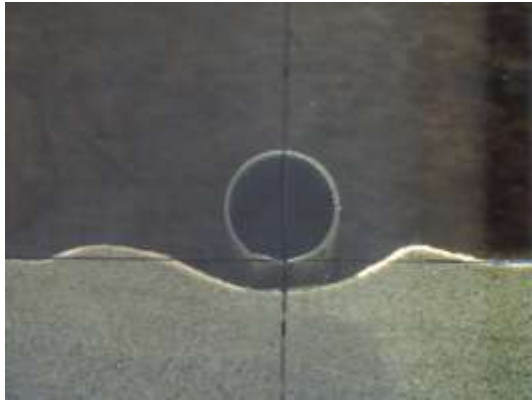


(c)



(d)

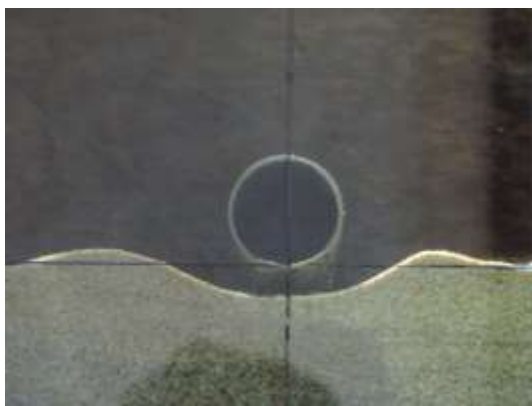
Gambar 5. Pengamatan *scouring* pipa kondisi meletak dengan  $H_{avg} = 6,92$  cm dan  $T_{avg} = 2,06$  s, (a)  $t = 0$  menit, (b)  $t = 5$  menit, (c)  $t = 10$  menit, (d)  $t = 15$  menit



(a)



(b)



(c)



(d)



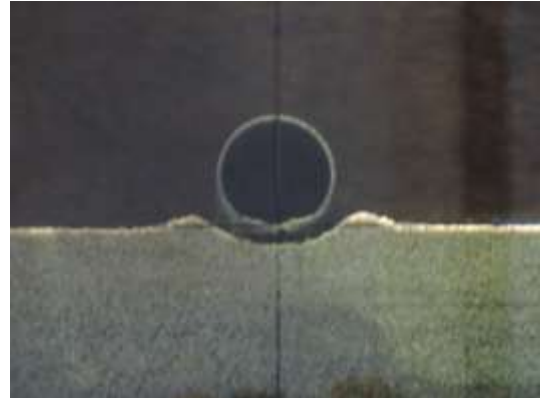
(e)

Gambar 6. Pengamatan *scouring* pipa kondisi meletak dengan  $H_{avg} = 6,92$  cm dan  $T_{avg} = 2,06$  s, (a)  $t = 20$  menit, (b)  $t = 25$  menit, (c)  $t = 30$  menit, (d)  $t = 35$  menit, (e)  $t = 40$  menit

**B.4 Pipa Kondisi *In-Trench* 2 mm dengan  $H_{avg} = 5,63$  cm dan  $T_{avg} = 2,03$  s**



(a)



(b)



(c)



(d)

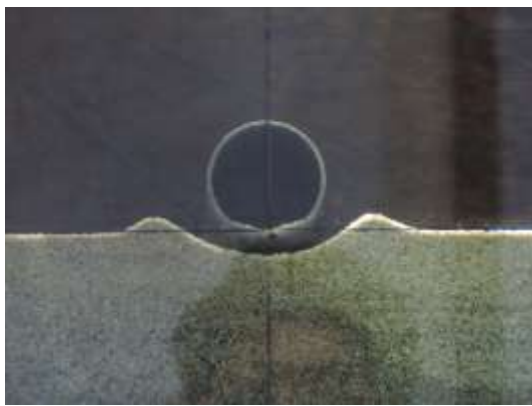
Gambar 7. Pengamatan *scouring* pipa kondisi *in-trench* 2 mm dengan  $H_{avg} = 5,63$  cm dan  $T_{avg} = 2,03$  s, (a)  $t = 0$  menit, (b)  $t = 5$  menit, (c)  $t = 10$  menit, (d)  $t = 15$  menit



(a)



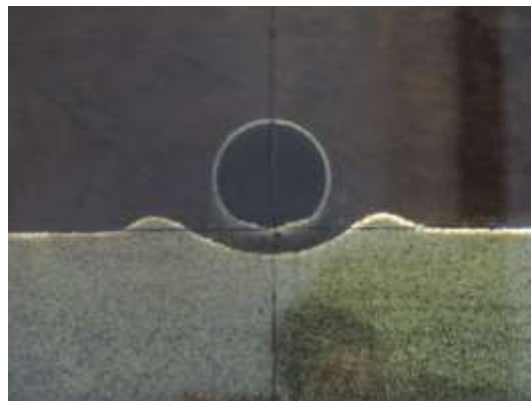
(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar 8. Pengamatan *scouring* pipa kondisi *in-trench* 2 mm dengan  $H_{avg} = 5,63$  cm dan  $T_{avg} = 2,03$  s, (a)  $t = 20$  menit, (b)  $t = 25$  menit, (c)  $t = 30$  menit, (d)  $t = 35$  menit, (e)  $t = 40$  menit

**B.5 Pipa Kondisi *In-Trench* 2 mm dengan  $H_{avg} = 6,57$  cm dan  $T_{avg} = 2,18$  s**



(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 9. Pengamatan *scouring* pipa kondisi *in-trench* 2 mm dengan  $H_{avg} = 6,57$  cm dan  $T_{avg} = 2,18$  s, (a)  $t = 0$  menit, (b)  $t = 5$  menit, (c)  $t = 10$  menit, (d)  $t = 15$  menit



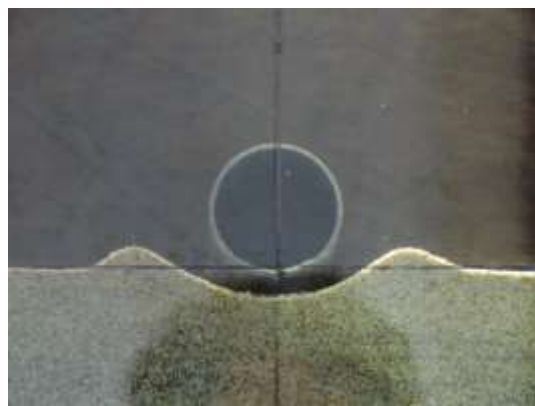
(a)



(b)



(c)



(d)

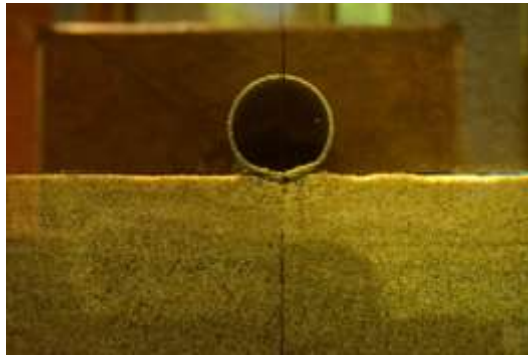


(e)

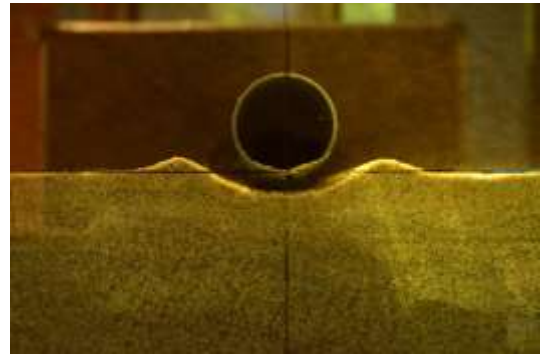
Gambar 10. Pengamatan *scouring* pipa kondisi *in-trench* 2 mm dengan  $H_{avg} = 6,57$  cm dan  $T_{avg} = 2,18$  s, (a)  $t = 20$  menit, (b)  $t = 25$  menit, (c)  $t = 30$  menit, (d)  $t = 35$  menit, (e)  $t = 40$  menit



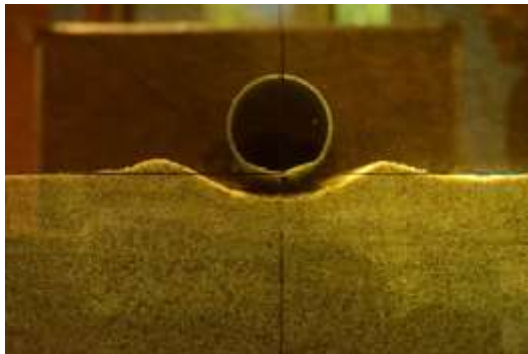
**B.6 Pipa Kondisi *In-Trench* 2 mm dengan  $H_{avg} = 6,95$  cm dan  $T_{avg} = 2,07$  s**



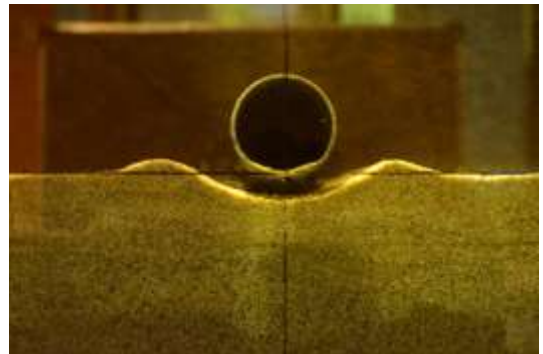
(a)



(b)

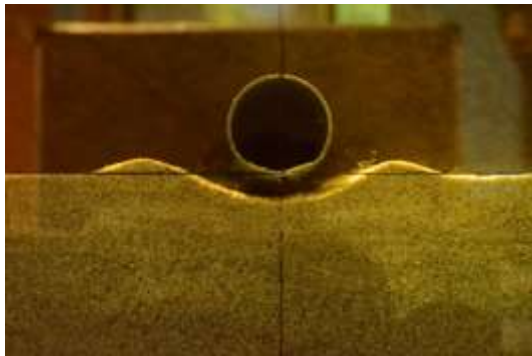


(c)

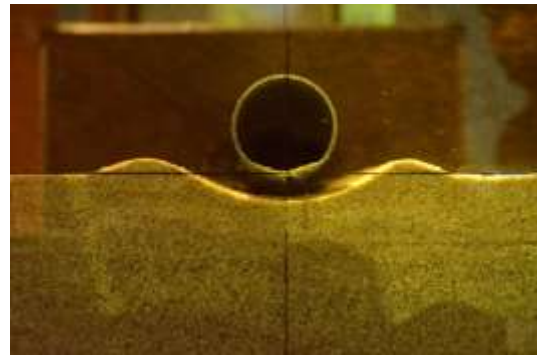


(d)

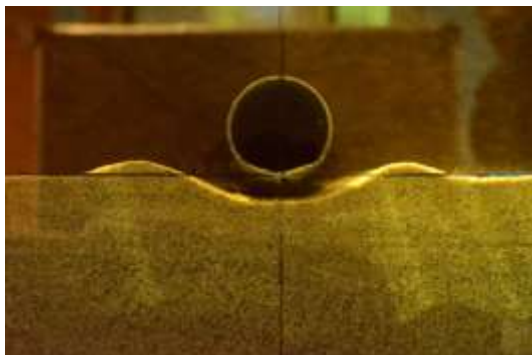
Gambar 11. Pengamatan *scouring* pipa kondisi *in-trench* 2 mm dengan  $H_{avg} = 6,95$  cm dan  $T_{avg} = 2,07$  s, (a)  $t = 0$  menit, (b)  $t = 5$  menit, (c)  $t = 10$  menit, (d)  $t = 15$  menit



(a)



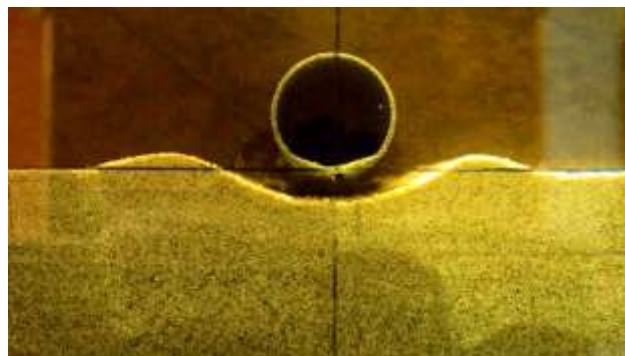
(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar 12. Pengamatan *scouring* pipa kondisi *in-trench* 2 mm dengan  $H_{avg} = 6,95$  cm dan  $T_{avg} = 2,07$  s, (a)  $t = 20$  menit, (b)  $t = 25$  menit, (c)  $t = 30$  menit, (d)  $t = 35$  menit, (e)  $t = 40$  menit



**B.7 Pipa Kondisi *In-Trench* 3 mm dengan  $H_{avg} = 5,99$  cm dan  $T_{avg} = 2,04$  s**



(a)



(b)

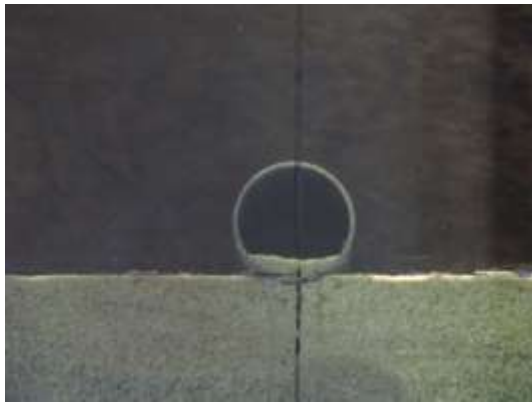


(c)

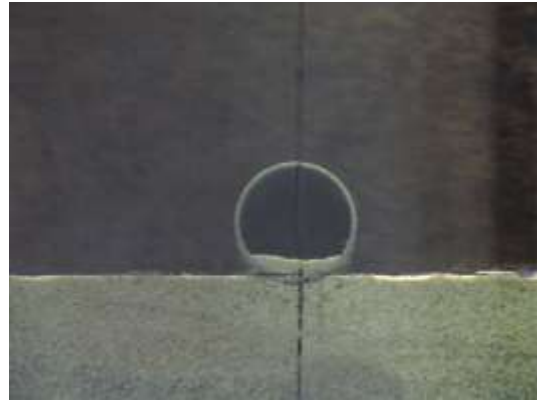


(d)

Gambar 13. Pengamatan *scouring* pipa kondisi *in-trench* 3 mm dengan  $H_{avg} = 5,99$  cm dan  $T_{avg} = 2,04$  s, (a)  $t = 0$  menit, (b)  $t = 5$  menit, (c)  $t = 10$  menit, (d)  $t = 15$  menit



(a)



(b)



(c)



(d)



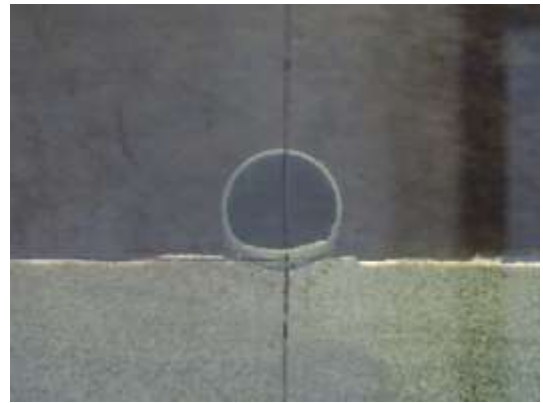
(e)

Gambar 14. Pengamatan *scouring* pipa kondisi *in-trench* 3 mm dengan  $H_{avg} = 5,99$  cm dan  $T_{avg} = 2,04$  s, (a)  $t = 20$  menit, (b)  $t = 25$  menit, (c)  $t = 30$  menit, (d)  $t = 35$  menit, (e)  $t = 40$  menit

**B.8 Pipa Kondisi *In-Trench* 3 mm dengan  $H_{avg} = 6,48$  cm dan  $T_{avg} = 2,16$  s**



(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 15. Pengamatan *scouring* pipa kondisi *in-trench* 3 mm dengan  $H_{avg} = 6,48$  cm dan  $T_{avg} = 2,16$  s, (a)  $t = 0$  menit, (b)  $t = 5$  menit, (c)  $t = 10$  menit, (d)  $t = 15$  menit



(a)



(b)



(c)



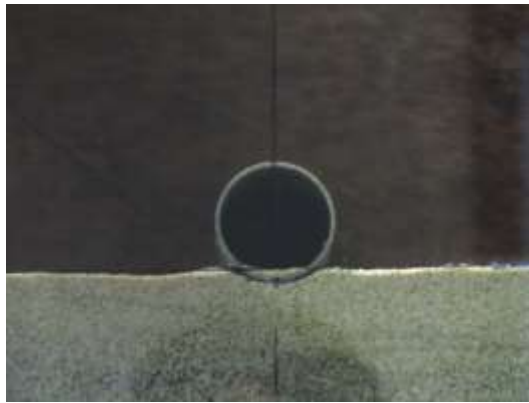
(d)



(e)

Gambar 16. Pengamatan *scouring* pipa kondisi *in-trench* 3 mm dengan  $H_{avg} = 6,48$  cm dan  $T_{avg} = 2,16$  s, (a)  $t = 20$  menit, (b)  $t = 25$  menit, (c)  $t = 30$  menit, (d)  $t = 35$  menit, (e)  $t = 40$  menit

**B.9 Pipa Kondisi *In-Trench* 3 mm dengan  $H_{avg} = 7,05$  cm dan  $T_{avg} = 2,06$  s**



(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 17. Pengamatan *scouring* pipa kondisi *in-trench* 4 mm dengan  $H_{avg} = 7,05$  cm dan  $T_{avg} = 2,06$  s, (a)  $t = 0$  menit, (b)  $t = 5$  menit, (c)  $t = 10$  menit, (d)  $t = 15$  menit



(a)



(b)



(c)



(d)



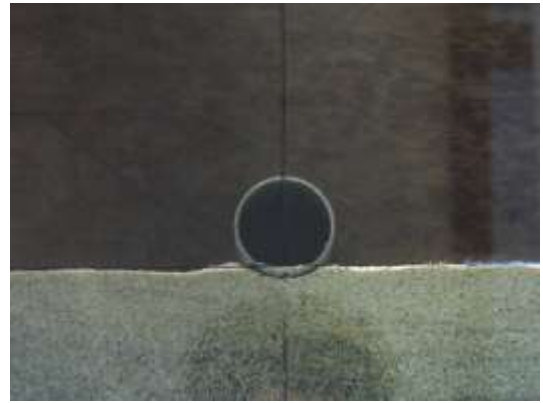
(e)

Gambar 18. Pengamatan *scouring* pipa kondisi *in-trench* 4 mm dengan  $H_{avg} = 7,05$  cm dan  $T_{avg} = 2,06$  s, (a)  $t = 20$  menit, (b)  $t = 25$  menit, (c)  $t = 30$  menit, (d)  $t = 35$  menit, (e)  $t = 40$  menit

**B.10 Pipa Kondisi *In-Trench* 4 mm dengan  $H_{avg} = 5,22$  cm dan  $T_{avg} = 2,02$  s**



(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 19. Pengamatan *scouring* pipa kondisi *in-trench* 4 mm dengan  $H_{avg} = 5,22$  cm dan  $T_{avg} = 2,02$  s, (a)  $t = 0$  menit, (b)  $t = 5$  menit, (c)  $t = 10$  menit, (d)  $t = 15$  menit





(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

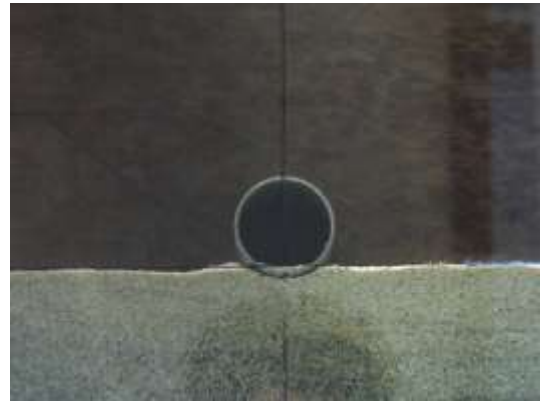
Gambar 20. Pengamatan *scouring* pipa kondisi *in-trench* 4 mm dengan  $H_{avg} = 5,22$  cm dan  $T_{avg} = 2,02$  s, (a)  $t = 20$  menit, (b)  $t = 25$  menit, (c)  $t = 30$  menit, (d)  $t = 35$  menit, (e)  $t = 40$  menit



**B.11 Pipa Kondisi *In-Trench* 4 mm dengan  $H_{avg} = 6,08$  cm dan  $T_{avg} = 2,17$  s**



(a)



(b)



(c)



(d)

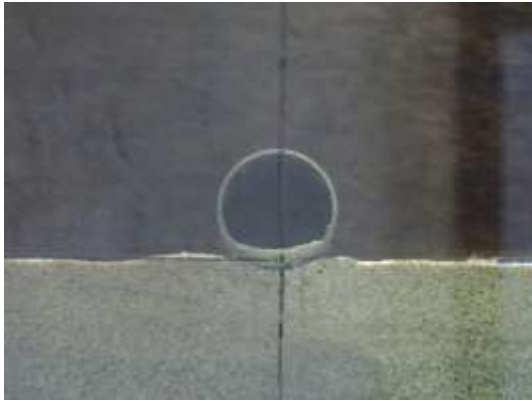
Gambar 21. Pengamatan *scouring* pipa kondisi *in-trench* 4 mm dengan  $H_{avg} = 6,08$  cm dan  $T_{avg} = 2,17$  s, (a)  $t = 0$  menit, (b)  $t = 5$  menit, (c)  $t = 10$  menit, (d)  $t = 15$  menit



(a)



(b)



(c)



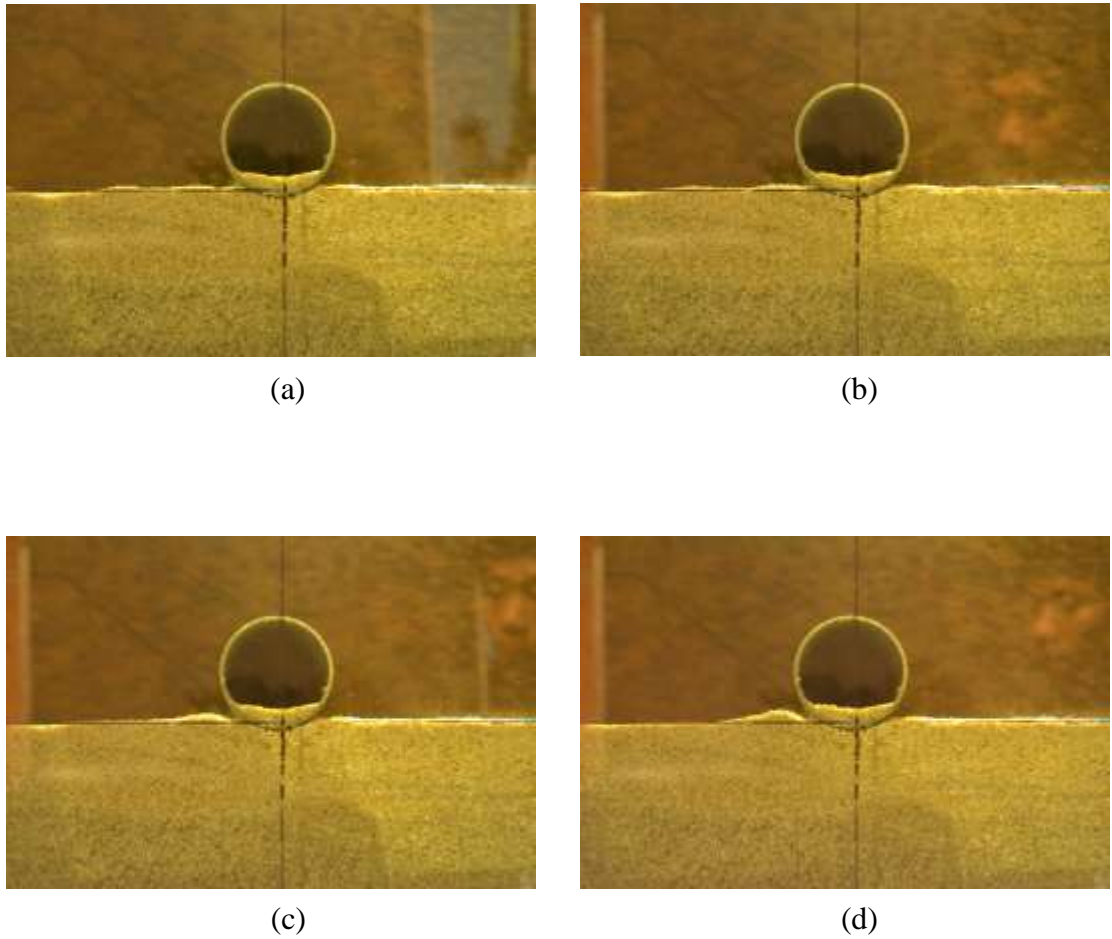
(d)



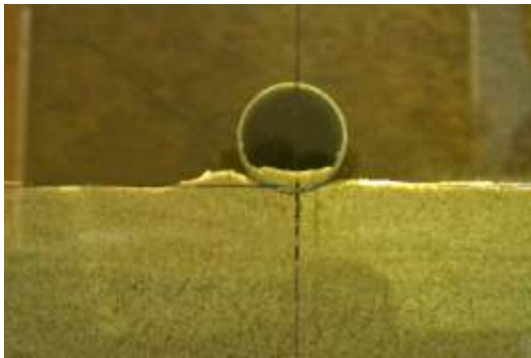
(e)

Gambar 22. Pengamatan *scouring* pipa kondisi *in-trench* 4 mm dengan  $H_{avg} = 6,08$  cm dan  $T_{avg} = 2,17$  s, (a)  $t = 20$  menit, (b)  $t = 25$  menit, (c)  $t = 30$  menit, (d)  $t = 35$  menit, (e)  $t = 40$  menit

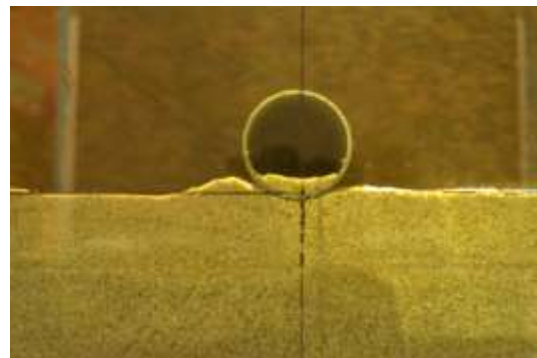
**B.12 Pipa Kondisi *In-Trench* 4 mm dengan  $H_{avg} = 6,66$  cm dan  $T_{avg} = 2,07$  s**



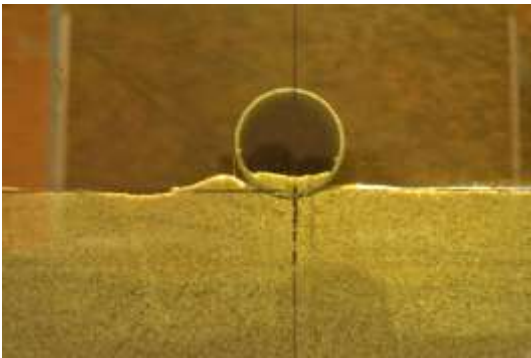
Gambar 23. Pengamatan *scouring* pipa kondisi *in-trench* 4 mm dengan  $H_{avg} = 6,66$  cm dan  $T_{avg} = 2,07$  s, (a)  $t = 0$  menit, (b)  $t = 5$  menit, (c)  $t = 10$  menit, (d)  $t = 15$  menit



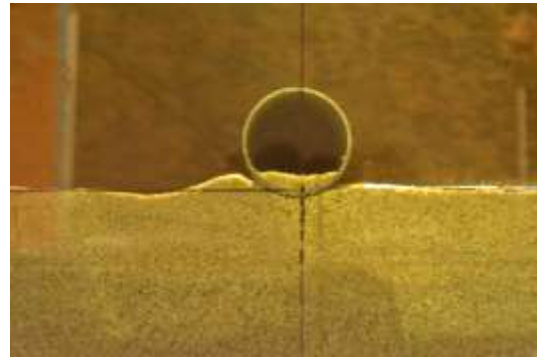
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar 24. Pengamatan *scouring* pipa kondisi *in-trench* 4 mm dengan  $H_{avg} = 6,66$  cm dan  $T_{avg} = 2,07$  s, (a)  $t = 20$  menit, (b)  $t = 25$  menit, (c)  $t = 30$  menit, (d)  $t = 35$  menit, (e)  $t = 40$  menit

## LAMPIRAN C

### DATA HUBUNGAN *SCOURING* DENGAN PARAMETER TAK BERDIMENSI

#### C.1 Data hubungan antara *wave steepness parameter* ( $H/gT^2$ ) dengan *non dimensional scour depth* ( $S_m/D$ )

Tabel 1. Data hubungan antara *wave steepness parameter* ( $H/gT^2$ )  
dengan *non dimensional scour depth* ( $S_m/D$ )

No	$H_{avg}$ (cm)	$T_{avg}$ (s)	$H/gT^2$	$S_d$ (cm)	W (cm)	S/D	Kondisi
1	5,55	2,02	0,0014	0,86	4,93	0,226	Meletak
2	6,37	2,15	0,0014	1,04	6,90	0,273	
3	6,92	2,06	0,0017	1,07	7,60	0,281	
4	5,63	2,03	0,0014	0,74	5,00	0,194	Trench 2 mm
5	6,57	2,18	0,0014	0,84	5,65	0,220	
6	6,95	2,07	0,0017	0,95	6,30	0,249	
7	5,99	2,04	0,0015	0,00	0,00	0,000	Trench 3 mm
8	6,48	2,16	0,0014	0,10	2,20	0,026	
9	7,05	2,06	0,0017	0,20	2,85	0,052	
10	5,22	2,01	0,0013	0,00	0,00	0,000	Trench 4 mm
11	6,08	2,17	0,0013	0,00	0,00	0,000	
12	6,66	2,07	0,0016	0,13	2,20	0,034	

**C.2 Data hubungan antara *wave steepness parameter* ( $H/gT^2$ )  
dengan *non dimensional scour width* ( $W_m/D$ )**

Tabel 2. Data hubungan antara *wave steepness parameter* ( $H/gT^2$ )  
dengan *non dimensional scour width* ( $W_m/D$ )

No	H <sub>avg</sub> (cm)	T <sub>avg</sub> (s)	H/gT <sup>2</sup>	S <sub>d</sub> (cm)	W (cm)	W/D	Kondisi
1	5,55	2,02	0,0014	0,86	4,93	0,226	Meletak
2	6,37	2,15	0,0014	1,04	6,90	0,273	
3	6,92	2,06	0,0017	1,07	7,60	0,281	
4	5,63	2,03	0,0014	0,74	5,00	0,194	Trench 2 mm
5	6,57	2,18	0,0014	0,84	5,65	0,220	
6	6,95	2,07	0,0017	0,95	6,30	0,249	
7	5,99	2,04	0,0015	0,00	0,00	0,000	Trench 3 mm
8	6,48	2,16	0,0014	0,10	2,20	0,026	
9	7,05	2,06	0,0017	0,20	2,85	0,052	
10	5,22	2,01	0,0013	0,00	0,00	0,000	Trench 4 mm
11	6,08	2,17	0,0013	0,00	0,00	0,000	
12	6,66	2,07	0,0016	0,13	2,20	0,034	

**C.3 Data hubungan antara bilangan KC**  
**dengan *non dimensional scour depth* ( $W_m/D$ )**

Tabel 4. Data hubungan antara bilangan KC  
dengan *non dimensional scour depth* ( $W_m/D$ )

Percobaan		D (cm)	KC	$S_m/D$
$H_{avg}$ (cm)	$T_{avg}$ (s)			
5,55	2,02	3,81	5,387	0,226
6,37	2,15	3,81	6,366	0,273
6,92	2,06	3,81	6,717	0,276
5,63	2,03	3,81	5,579	0,194
6,57	2,18	3,81	6,909	0,220
6,95	2,07	3,81	6,881	0,249
5,99	2,04	3,81	5,935	0,000
6,48	2,16	3,81	6,606	0,026
7,05	2,06	3,81	6,766	0,052
5,22	2,01	3,81	4,903	0,000
6,08	2,17	3,81	5,961	0,000
6,66	2,07	3,81	6,400	0,034

**C.4 Data hubungan antara bilangan KC  
dengan *non dimensional scour width* ( $W_m/D$ )**

Tabel 4. Data hubungan antara bilangan KC  
dengan *non dimensional scour width* ( $W_m/D$ )

Percobaan		D (cm)	KC	$W_m/D$
$H_{avg}$ (cm)	$T_{avg}$ (s)			
5,55	2,02	3,81	5,387	1,294
6,37	2,15	3,81	6,366	1,811
6,92	2,06	3,81	6,717	1,995
5,63	2,03	3,81	5,579	1,312
6,57	2,18	3,81	6,909	1,483
6,95	2,07	3,81	6,881	1,654
5,99	2,04	3,81	5,935	0,000
6,48	2,16	3,81	6,606	0,577
7,05	2,06	3,81	6,766	0,748
5,22	2,01	3,81	4,903	0,000
6,08	2,17	3,81	5,961	0,000
6,66	2,07	3,81	6,400	0,577



**C.5 Data hubungan antara *buried depth-diameter ratio* ( $e/D$ )  
dengan *non dimensional scour depth* ( $S_m/D$ )**

Tabel 5. Data hubungan antara *buried depth-diameter ratio* ( $e/D$ )  
dengan *non dimensional scour depth* ( $S_m/D$ )

Percobaan		D (cm)	e	$e/D$	$S_m/D$	KC
$H_{avg}$ (cm)	$T_{avg}$ (s)					
5,55	2,02	3,81	0,000	0,000	0,226	5,500
5,63	2,03	3,81	-2,000	-0,052	0,194	5,500
5,99	2,04	3,81	-3,000	-0,079	0,000	5,500
5,22	2,01	3,81	-4,000	-0,105	0,000	5,500
6,08	2,17	3,81	-4,000	-0,105	0,000	5,500
6,37	2,15	3,81	0,000	0,000	0,273	6,500
6,92	2,06	3,81	0,000	0,000	0,276	6,500
6,57	2,18	3,81	-2,000	-0,052	0,220	6,500
6,95	2,07	3,81	-2,000	-0,052	0,249	6,500
6,48	2,16	3,81	-3,000	-0,079	0,026	6,500
7,05	2,06	3,81	-3,000	-0,079	0,052	6,500
6,66	2,07	3,81	-4,000	-0,105	0,034	6,500

**C.6 Data hubungan antara *buried depth-diameter ratio* ( $e/D$ )  
dengan *non dimensional scour width* ( $W_m/D$ )**

Tabel 6. Data hubungan antara *buried depth-diameter ratio* ( $e/D$ )  
dengan *non dimensional scour width* ( $W_m/D$ )

Percobaan		D (cm)	e	$e/D$	$W_m/D$	KC
$H_{avg}$ (cm)	$T_{avg}$ (s)					
5,55	2,02	3,81	0,000	0,000	1,294	5,500
5,63	2,03	3,81	-2,000	-0,052	1,312	5,500
5,99	2,04	3,81	-3,000	-0,079	0,000	5,500
5,22	2,01	3,81	-4,000	-0,105	0,000	5,500
6,08	2,17	3,81	-4,000	-0,105	0,000	5,500
6,37	2,15	3,81	0,000	0,000	1,811	6,500
6,92	2,06	3,81	0,000	0,000	1,995	6,500
6,57	2,18	3,81	-2,000	-0,052	1,483	6,500
6,95	2,07	3,81	-2,000	-0,052	1,654	6,500
6,48	2,16	3,81	-3,000	-0,079	0,577	6,500
7,05	2,06	3,81	-3,000	-0,079	0,748	6,500
6,66	2,07	3,81	-4,000	-0,105	0,577	6,500

### C.7 Data hubungan antara *mobility parameter* ( $\Psi$ )

dengan *non dimensional scour depth* ( $S_m/D$ )

Tabel 7. Data hubungan antara *mobility parameter* ( $\Psi$ )

dengan *non dimensional scour depth* ( $S_m/D$ )

Percobaan		$U_m$	$g$	$d_{50}$	$s$	$\Psi$	$S_m/D$
$H_{avg}$ (cm)	$T_{avg}$ (s)						
5,55	2,02	0,133	9,81	0,55	2,850	1,779	0,226
5,63	2,03	0,154	9,81	0,55	2,850	2,391	0,273
5,99	2,04	0,166	9,81	0,55	2,850	2,767	0,276
5,22	2,01	0,136	9,81	0,55	2,850	1,860	0,194
6,08	2,17	0,162	9,81	0,55	2,850	2,645	0,220
6,37	2,15	0,168	9,81	0,55	2,850	2,830	0,249
6,92	2,06	0,145	9,81	0,55	2,850	2,105	0,000
6,57	2,18	0,158	9,81	0,55	2,850	2,510	0,026
6,95	2,07	0,168	9,81	0,55	2,850	2,844	0,052
6,48	2,16	0,124	9,81	0,55	2,850	1,533	0,000
7,05	2,06	0,147	9,81	0,55	2,850	2,151	0,000
6,66	2,07	0,159	9,81	0,55	2,850	2,544	0,034

### C.8 Data hubungan antara *mobility parameter* ( $\Psi$ )

dengan *non dimensional scour width* ( $W_m/D$ )

Tabel 8. Data hubungan antara *mobility parameter* ( $\Psi$ )

dengan *non dimensional scour width* ( $W_m/D$ )

Percobaan		$U_m$	$g$	$d_{50}$	$s$	$\Psi$	$W_m/D$
$H_{avg}$ (cm)	$T_{avg}$ (s)						
5,55	2,02	0,133	9,81	0,55	2,850	1,779	1,294
5,63	2,03	0,154	9,81	0,55	2,850	2,391	1,811
5,99	2,04	0,166	9,81	0,55	2,850	2,767	1,995
5,22	2,01	0,136	9,81	0,55	2,850	1,860	1,312
6,08	2,17	0,162	9,81	0,55	2,850	2,645	1,483
6,37	2,15	0,168	9,81	0,55	2,850	2,830	1,654
6,92	2,06	0,145	9,81	0,55	2,850	2,105	0,000
6,57	2,18	0,158	9,81	0,55	2,850	2,510	0,577
6,95	2,07	0,168	9,81	0,55	2,850	2,844	0,748
6,48	2,16	0,124	9,81	0,55	2,850	1,533	0,000
7,05	2,06	0,147	9,81	0,55	2,850	2,151	0,000
6,66	2,07	0,159	9,81	0,55	2,850	2,544	0,577

**C.9 Data hubungan antara *shield parameter* ( $\theta$ )  
dengan *non dimensional scour depth* ( $S_m/D$ )**

Tabel 9. Data hubungan antara *shield parameter* ( $\theta$ )  
dengan *non dimensional scour depth* ( $S_m/D$ )

Percobaan		A	A/ $k_s$	$f_w$	$U_m$	$U_{fm}$	$\theta$	$S_m/D$
$H_{avg}$ (cm)	$T_{avg}$ (s)							
5,55	2,02	0,033	29,69	0,041	0,133	0,019	0,036	0,226
5,63	2,03	0,039	35,09	0,037	0,154	0,021	0,045	0,273
5,99	2,04	0,041	37,03	0,036	0,166	0,022	0,050	0,276
5,22	2,01	0,034	30,75	0,040	0,136	0,019	0,037	0,194
6,08	2,17	0,042	38,09	0,036	0,162	0,022	0,047	0,220
6,37	2,15	0,042	37,93	0,036	0,168	0,022	0,051	0,249
6,92	2,06	0,036	32,72	0,039	0,145	0,020	0,041	0,000
6,57	2,18	0,040	36,42	0,037	0,158	0,021	0,046	0,026
6,95	2,07	0,041	37,30	0,036	0,168	0,023	0,051	0,052
6,48	2,16	0,030	27,03	0,043	0,124	0,018	0,033	0,000
7,05	2,06	0,036	32,86	0,039	0,147	0,020	0,041	0,000
6,66	2,07	0,039	35,28	0,037	0,159	0,022	0,047	0,034

**C.10 Data hubungan antara *shield parameter* ( $\theta$ )  
dengan *non dimensional scour width* ( $W_m/D$ )**

Tabel 10. Data hubungan antara *shield parameter* ( $\theta$ )  
dengan *non dimensional scour width* ( $W_m/D$ )

Percobaan		A	A/ $k_s$	$f_w$	$U_m$	$U_{fm}$	$\theta$	$W_m/D$
$H_{avg}$ (cm)	$T_{avg}$ (s)							
5,55	2,02	0,033	29,69	0,041	0,133	0,019	3,616	1,294
5,63	2,03	0,039	35,09	0,037	0,154	0,021	4,454	1,811
5,99	2,04	0,041	37,03	0,036	0,166	0,022	5,012	1,995
5,22	2,01	0,034	30,75	0,040	0,136	0,019	3,711	1,312
6,08	2,17	0,042	38,09	0,036	0,162	0,022	4,723	1,483
6,37	2,15	0,042	37,93	0,036	0,168	0,022	5,063	1,654
6,92	2,06	0,036	32,72	0,039	0,145	0,020	4,067	0,000
6,57	2,18	0,040	36,42	0,037	0,158	0,021	4,587	0,577
6,95	2,07	0,041	37,30	0,036	0,168	0,023	5,134	0,748
6,48	2,16	0,030	27,03	0,043	0,124	0,018	3,271	0,000
7,05	2,06	0,036	32,86	0,039	0,147	0,020	4,147	0,000
6,66	2,07	0,039	35,28	0,037	0,159	0,022	4,727	0,577

## LAMPIRAN D

### DATA PERBANDINGAN HASIL EKSPERIMEN DENGAN PENELITIAN LAIN

#### D.1 Data perbandingan hasil eksperimen pengaruh KC terhadap *non dimensional scour depth* ( $S_m/D$ )

Tabel 11. Data perbandingan hasil eksperimen pengaruh KC  
terhadap *non dimensional scour depth* ( $S_m/D$ )

Eksperimen		Penelitian Sumer		Penelitian Yasa		Penelitian Sumer	
$(e/D)_{KC\ 5,5}$	$(S_m/D)_{KC\ 5,5}$	$(e/D)_{KC\ 11}$	$(S_m/D)_{KC\ 11}$	$(e/D)_{KC<15}$	$(S_m/D)_{KC\ 11}$	$(e/D)_{KC\ 900}$	$(S_m/D)_{KC\ 900}$
0	0,226	-0,470	0,983	0,260	0,340	-0,700	2,15
0	0,273	0,038	0,865	0,300	0,170	-0,500	2,18
0	0,276	0,271	0,637	0,500	0,160	0,000	2,35
-0,052	0,194	0,500	0,267	0,700	0,109	0,000	2,50
-0,052	0,220	2,000	0,043	1,000	0,029	1,000	1,39
-0,052	0,249					2,000	1,28
-0,079	0,000						
-0,079	0,026						
-0,079	0,052						
-0,105	0,000						
-0,105	0,000						
-0,105	0,034						

**D.2 Data perbandingan hasil eksperimen pengaruh  $e/D$   
terhadap *non dimensional scour depth* ( $S_m/D$ )**

Tabel 12. Data perbandingan hasil eksperimen pengaruh  $e/D$   
terhadap *non dimensional scour depth* ( $S_m/D$ )

Eksperimen		Penelitian Lain					
KC	$(S_m/D)$	$KC_{Luc}$	$(S_m/D)_{Luc}$	$KC_{Sum}$	$(S_m/D)_{Sum}$	$KC_{Yasa}$	$(S_m/D)_{Yasa}$
5,387	0,226	5,922	0,230	2,055	0,080	5,580	0,319
6,366	0,273	4,581	0,299	6,011	0,198	4,700	0,280
6,717	0,276	3,680	0,176	7,040	0,280	6,170	0,240
5,579	0,194	2,667	0,145	7,070	0,313	3,127	0,239
6,909	0,220	1,795	0,131			3,835	0,221
6,881	0,249	7,057	0,252			2,350	0,209
5,935	0,000	4,652	0,245			6,185	0,199
6,606	0,026					1,880	0,178
6,766	0,052					3,127	0,179
4,903	0,000					4,877	0,180
5,961	0,000					3,990	0,158
6,400	0,034					2,200	0,147
						1,480	0,108
						0,193	0,077
						6,160	0,027



## BIODATA PENULIS



**Dimas Ramadhan** dilahirkan di Surabaya, 16 Februari 1996, merupakan anak pertama dari tiga bersaudara. Penulis telah menyelesaikan pendidikan formal mulai dari TK Mekar Sari Surabaya, SDN Ujung IX Surabaya, SMPN 11 Surabaya, hingga SMAN 9 Surabaya. Setelah lulus dari SMAN 9 Surabaya pada tahun 2013, penulis langsung melanjutkan kuliah lewat jalur SNMPTN Bidik Misi dan diterima di Departemen Teknik Kelautan-FTK-ITS pada tahun 2013 juga. Penulis terdaftar sebagai mahasiswa ITS dengan NRP 4313100073. Selama kuliah empat tahun di Departemen Teknik Kelautan, penulis telah menempu 152 SKS dan mengambil bidang keahlian Teknik dan Manajemen Pantai (*Coastal Engineering and Management*). Selama menjadi mahasiswa, penulis juga aktif dalam kegiatan kemahasiswaan. Pada tahun 2014-2015, penulis menjadi Staff Departemen Sosial Masyarakat Himpunan Mahasiswa Teknik Kelautan (HIMATEKLA) dan Staff Biro Kajian Strategis BEM FTK ITS. Pada tahun 2015-2016, penulis diamanahi sebagai Ketua Departemen Sosial Masyarakat HIMATEKLA. Pada bulan Juni - Agustus 2016, penulis diterima untuk menjalankan Kerja Praktek di PT. KHI Pipe Industries dengan mempelajari proses produksi pipa, prosedur pengujian NDT spesimen pipa dan prosedur pengujian *coating* pipa. Apabila ingin menanyakan perihal tugas akhir ini, dapat menghubungi penulis pada alamat email sebagai berikut [dimasramh@gmail.com](mailto:dimasramh@gmail.com).